



**Pedro Alexandre Melo de Oliveira Pato**

Licenciado em Engenharia do Ambiente

## **Análise do Ciclo de Vida do Cimento**

**Caso de Estudo: Fábrica da Secil-Outão**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia do Ambiente

Orientador: Professor Doutor Francisco Manuel Freire Cardoso Ferreira, Professor Auxiliar,  
FCT-UNL

Co-orientadora: Engenheira Susana Ribeiro Mercier, Fábrica Secil-Outão

Júri:

Presidente: Professora Doutora Maria Paula Baptista da Costa Antunes

Arguente: Professor Doutor João Miguel Dias Joanaz de Melo

Vogal: Professor Doutor Francisco Manuel Freire Cardoso Ferreira



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro, 2015**



## **Análise de Ciclo de Vida do Cimento – Caso de estudo: fábrica Secil-Outão**

*Copyright* © Pedro Alexandre Melo de Oliveira Pato,  
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa,  
Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **Agradecimentos**

A toda a equipa da fábrica Secil-Outão pelo acolhimento e prestabilidade demonstrados ao longo dos seis meses de estágio. Um especial agradecimento à co-orientadora Eng<sup>a</sup> Susana Mercier, à Eng<sup>a</sup> Catarina Tudella, à Eng<sup>a</sup> Teresa Escarducha, ao Técnico Tiago Santos, ao Eng<sup>o</sup> Nuno Tempera e ao Eng<sup>o</sup> António Curioso pelos conhecimentos transmitidos, disponibilidade, compreensão e momentos de descontração.

Ao Professor Doutor Francisco Ferreira pela orientação, conhecimentos transmitidos, apoio e disponibilidade demonstrados ao longo do desenvolvimento da presente dissertação.

À minha mãe e à Ana pelo apoio incondicional ao longo deste percurso. À Alexandra, à Mónica, à Tatiana e ao Marco pelo apoio e amizade de sempre. À Angélica, à Carolina e à Sara.



## Resumo

O cimento é o material de construção mais utilizado na edificação de estruturas. A sua produção compreende um consumo material e energético muito significativo que se traduz numa contribuição igualmente relevante para a deterioração do ambiente.

A presente dissertação consistiu na aplicação da abordagem de ciclo de vida ao processo de produção de dois tipos de cimento – *CEM I* 42,5 e *CEM II* 32,5 – com a finalidade de calcular o impacto ambiental de cada um e comprovar o desempenho ambiental superior do segundo. A análise do ciclo de vida foi desenvolvida de acordo com uma abordagem *cradle-to-gate*, segundo os requisitos das normas *ISO* 14040 e 14044 e da Norma Europeia 15804/2012. Os dados utilizados são específicos do processo de produção de cimento na fábrica de cimento Secil-Outão.

Os resultados dos inventários do ciclo de vida demonstraram que, decorrente da utilização de uma maior quantidade de clínquer no seu fabrico, o *CEM I* 42,5 exige um maior consumo de matérias-primas naturais e de energia, tanto elétrica como térmica. O *CEM II* 32,5 apresenta consumos materiais e energéticos inferiores ao cimento do tipo I, devido a uma taxa de incorporação de clínquer mais baixa, mas compreende um consumo de matérias-primas secundárias mais alto. Em relação aos fluxos de saída, o *CEM I* 42,5 é responsável por níveis de emissão de CO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> e outros poluentes superiores aos do *CEM II* 32,5, em consequência do consumo elevado de combustíveis. A produção do cimento do tipo I é responsável por uma maior contribuição para a ecotoxicidade de sistemas marinhos e terrestres e para a deterioração da saúde pública, através da emissão de metais pesados, e para o agravamento das alterações climáticas, devido às emissões de CO<sub>2</sub>. A produção do cimento do tipo II apresenta um menor impacto ambiental e, por isso, um desempenho ambiental superior.

**Palavras-chave:** Análise de ciclo de vida; cimento; desempenho ambiental; *cradle-to-gate*; inventário do ciclo de vida; avaliação de impacto ambiental.





## **Abstract**

Cement is the most common building material amidst the construction sector. Its production comprehends the consumption of high quantities of material and energetic resources that translate in an equally relevant contribution for the ecosystem's ongoing deterioration.

This thesis consists in the application of the life cycle perspective to the production of two types of cement – CEM I 42,5 e CEM II 32,5 – with the main goal of calculating the environmental impact of each one and prove the type II cement has the best environmental performance. The life cycle assessment was developed from cradle-to-gate, accordingly with the requisites of ISO 14040 and 14041 and the European Norm 15804/2012. All the data used in this life cycle analysis is related to the cement's production process in the cement plant Secil-Outão.

Through the life cycle inventories results it was verified that, due to a high use of clinker in its production, CEM I 42,5 comprehends an higher consumption of natural raw materials and energy, both electric and thermic. CEM II 32,5 is associated with lower material and energetic consumptions because of an inferior clinker incorporation rate, but has a higher rate of secondary raw materials consumption. In terms of the process outputs, CEM I 42,5 is responsible for higher emissions of CO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> and other air pollutants, due to the consumption of great amounts of fossil and alternative fuels. The life cycle impact assessment results determined CEM I 42,5 is responsible of a more significant contribution to the ecotoxicity of marine and terrestrial systems and the deterioration of public health, due to heavy metals emission, and the intensification of climate change, because of high levels of CO<sub>2</sub> emission. CEM II 32,5 is responsible for a lower environmental impact, due to which it has a better environmental performance.

**Key-words:** Life cycle assessment; cement; environmental performance; cradle-to-gate; life cycle inventory; life cycle impact assessment.



# Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento e Relevância do Tema .....	1
1.2	Objetivos e Âmbito.....	3
1.3	Metodologia geral .....	3
1.4	Organização da dissertação .....	4
2	Revisão da Literatura .....	5
2.1	Análise do Ciclo de Vida.....	5
2.1.1	Conceito.....	5
2.1.2	História.....	6
2.1.3	Descrição.....	8
2.1.4	Metodologia .....	10
2.1.5	<i>Softwares de ACV</i> .....	18
2.1.6	Benefícios e limitações da ACV.....	19
2.2	Cimento .....	20
2.2.1	Indústria cimenteira .....	20
2.2.2	Caracterização.....	25
2.2.3	Processo de fabrico .....	27
2.2.4	Consumos e emissões .....	31
2.2.5	Impactes ambientais da produção de cimento.....	39
3	Metodologia.....	43
3.1	Caso de Estudo .....	43
3.2	Metodologia de ACV.....	49

3.2.1	Definição dos objetivos e do âmbito .....	49
3.2.2	Inventário do ciclo de vida .....	52
3.2.3	Avaliação de impacte do ciclo de vida .....	66
4	Resultados e Discussão .....	75
4.1	Inventário do ciclo de vida .....	75
4.2	Avaliação de impacte do ciclo de vida .....	85
5	Conclusões.....	97
5.1	Interpretação do ciclo de vida .....	97
5.2	Principais conclusões .....	98
5.3	Principais limitações .....	100
5.4	Desenvolvimentos futuros .....	101
6	Referências .....	103
7	Anexos .....	113

## Índice de Figuras

Figura 2.1 – Estrutura da ACV em 1991 (à esquerda) e em 1993 no Código de Prática da SETAC (à direita) (fonte: adaptado de Klöpffer, 2014) .....	7
Figura 2.2 – Esquema exemplo de um sistema de produto (fonte: adaptado de ISO, 2006a) .....	9
Figura 2.3 – Esquema representativo dos fluxos associados aos processos unitários .....	10
Figura 2.4 – Estrutura da ACV segundo as normas ISO (fonte: adaptado de ISO, 2006a).....	11
Figura 2.5 – Fluxograma de desenvolvimento do ICV segundo as normas ISO (fonte: adaptado de ISO, 2006b) .....	14
Figura 2.6 – Fluxograma de desenvolvimento da AICV de acordo com as normas ISO (fonte: adaptado de ISO, 2006b) .....	15
Figura 2.7 – Estrutura da componente de Interpretação da ACV (fonte: adaptado de ISO, 2006b).....	17
Figura 2.8 – Variação da produção de cimento nos cinco continentes e na Federação Russa, entre 2001-2014 (fonte: Cembureau, 2014) .....	20
Figura 2.9 – Evolução da produção e do consumo de cimento em Portugal, entre 2009 e 2014 (fonte: adaptado de Cimpor 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 e Secil 2010, 2011a, 2012, 2013a, 2014) .	21
Figura 2.10 – Esquema representativo da economia circular num processo produtivo (fonte: adaptado de EC, 2014a) .....	23
Figura 2.11 – Esquema de um processo de produção de cimento (fonte: adaptado de Amato, 2013)	27
Figura 2.12 – Consumo de combustíveis fósseis, por categoria (em %) (fonte: adaptado de Cembureau, 2013c).....	33
Figura 2.13 – Consumo de combustíveis alternativos, por tipologia, (em %) (fonte: adaptado de Cembureau, 2013a) .....	35
Figura 2.14 – Consumo de energia elétrica (em %) no processo de produção do cimento (fonte: Cembureau, 2013a) .....	35
Figura 2.15 – Emissão de CO <sub>2</sub> , em %, por etapa da produção de cimento (fonte: WBCSD-CSI, 2015) .....	37
Figura 2.16 – Emissões globais de CO <sub>2</sub> relativas ao consumo de combustíveis fósseis e produção de cimento, por região (fonte: EC, 2014b).....	40

Figura 3.1 - Volume de negócios (em %) do grupo Secil nos países em que desenvolve atividade (fonte: adaptado de Secil 2014a) .....	43
Figura 3.2 – Evolução da produção de cimento do grupo em Portugal, nos anos entre 2009-2014 (fontes: adaptado de Secil 2010, 2011a, 2012, 2013a, 2014a) .....	44
Figura 3.3 – Localização geográfica da fábrica de cimento Secil-Outão (fonte: <i>Google Maps</i> ). .....	45
Figura 3.4 – Fotografias da fábrica de Outão, vista aérea (à esquerda) e cais (à direita) (fontes: Secil 2011b e <i>Google Maps</i> ) .....	46
Figura 3.5 – Evolução da produção de cimento na fábrica Secil-Outão, no período entre 2009-2014 (fonte: adaptado de Secil 2014c e 2013c) .....	46
Figura 3.6 – Produção de cada tipo de cimento no ano de 2014 (em %) (fonte: adaptado de Secil 2014a) .....	47
Figura 3.7 – Evolução da TIC (em %) na fábrica Secil-Outão, entre 2009 e 2014 (fonte: adaptado de Secil 2014c e 2013c) .....	47
Figura 3.8 – Evolução da taxa de substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos (em %), na fábrica Secil-Outão, entre 2009 e 2014 (fonte: adaptado de Secil 2014c e 2013c) .....	48
Figura 3.9 – Evolução da taxa de substituição de MPN por MPS (em %), na fábrica Secil-Outão, entre 2009 e 2014 (fonte: adaptado de Secil 2014c e 2013c) .....	48
Figura 3.10 – Evolução da emissão de CO <sub>2</sub> (em kton), na fábrica Secil-Outão, entre 2009 e 2014 (fonte: adaptado de Secil 2014c e 2013c) .....	49
Figura 3.11 – Representação do sistema de produção do cimento .....	51
Figura 3.12 – Diagrama de fluxos do processo de perfuração e rebentamento .....	54
Figura 3.13 – Diagrama de fluxos da fase de britagem .....	54
Figura 3.14 – Diagrama de fluxos da fase de moagem de cru .....	55
Figura 3.15 – Diagrama de fluxos da fase de moagem de combustíveis .....	56
Figura 3.16 – Diagrama de fluxos do processo de cozedura de cru .....	57
Figura 3.17– Diagramas de fluxo da moagem de cimento I 42,5 e II 32,5 .....	57
Figuras 3.19 – Diagramas de fluxos da fase de expedição dos cimentos <i>CEM I</i> 42,5 e <i>CEM II</i> 32,5 .....	58

Figuras 3.21 – Diagramas de fluxo do transporte interno de MPN e da produção de resíduos .....	58
Figura 3.23 – Esquema do sistema de produto do cimento II 32,5 construído no <i>software</i> openLCA ..	65
Figura 3.22 – Esquema do sistema de produto do cimento I 42,5 construído no <i>software</i> openLCA ..	65
Figura 4.1 – Composição em MPN e MPS do <i>CEM I</i> 42,5 (à esquerda) e do <i>CEM II</i> 32,5 (à direita) (em %) .....	77
Figura 4.2 – Contribuição do processo de produção principal e dos processos secundários (em %) no resultado dos indicadores de impacto ambiental.....	86
Figura 4.3 – Significância relativa (em %) das categorias de impacto em relação ao impacto global da produção dos <i>CEM I</i> 42,5 e <i>CEM II</i> 32,5.....	93
Figura 4.4 – Contribuição da produção de 1 ton de cimento do tipo I 42,5 e do tipo II 32,5 para o agravamento dos impactos ambientais analisados, com base nos resultados normalizados dos indicadores.....	94





## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Descrição sumária dos <i>softwares</i> de ACV SimaPRO, GaBi e openLCA.....	18
Tabela 2.2 – Composição do clínquer Portland (fonte: adaptado de van Oss, 2011) .....	25
Tabela 2.3 – Composição química do cimento (fonte: Imbabi <i>et al.</i> , 2012).....	26
Tabela 2.4 – Classificação dos tipos cimento de acordo com a NE 197-1:2000.....	26
Tabela 2.5 – Resumo do processo de cozedura do cru e produção do clínquer (fonte: adaptado de van Oss & Padovani, 2002; EMEP/EEA, 2013; Madloul <i>et al.</i> , 2011) .....	31
Tabela 2.6 – Correspondência entre MPN e MPS (fonte: adaptado de EC, 2013) .....	32
Tabela 2.7 – Consumo de energia térmica por tipo de forno (fonte: adaptado de Usón <i>et al.</i> , 2013) ..	33
Tabela 2.8 – Classificação dos combustíveis alternativos utilizados na produção de cimento (fonte: Madloul <i>et al.</i> , 2011) .....	34
Tabela 2.9 – Emissão média de CO <sub>2</sub> por tipo de cimento (fonte: adaptado de ECRA 2015a, 2015b, 2015c e IBU, 2012) .....	37
Tabela 2.10 – Emissões médias dos gases de combustão e outros poluentes emitidos durante a fabricação de cimento (fonte: adaptado de UK-EA, 2011, e EC, 2013) .....	38
Tabela 3.1 – Legenda dos fluxos representados nos diagramas dos processos unitários.....	53
Tabela 3.2 – Caracterização dos dados recolhidos.....	59
Tabela 3.3 – Atribuição dos resíduos gerados ao processo unitário de origem .....	60
Tabela 3.4 – Valores de PCI utilizados no cálculo da energia térmica obtida através dos combustíveis .....	61
Tabela 3.5 – Valores de TIC utilizados na normalização dos fluxos .....	63
Tabela 3.6 – Processos da <i>ELCD</i> atribuídos à produção de energia primária .....	64
Tabela 3.7 – Meios de transporte atribuídos aos processos de transporte do sistema de produto.....	65
Tabela 3.8 – Equivalência entre fluxos de entrada do ICV e os fluxos da <i>ELCD</i> (com respetiva alocação, em %). .....	66

Tabela 3.9 – Equivalência entre os fluxos de MPS e os fluxos da <i>ELCD</i> (com respetiva alocação, em %)	67
Tabela 3.10 – Equivalência entre os fluxos de combustíveis alternativos e os fluxos da <i>ELCD</i> (com respetiva alocação, em %)	67
Tabela 3.11 – Equivalência entre os fluxos de emissões atmosféricas e os fluxos da <i>ELCD</i> (com respetiva alocação, em %)	67
Tabela 3.12 – Equivalência entre os fluxos de resíduos do ICV e os fluxos da <i>ELCD</i> (com respetiva alocação, em %)	68
Tabela 3.13 – Categorias de impacte e respetivos indicadores e fatores de caracterização	70
Tabela 3.14 – Classificação dos fluxos do ICV da produção de cimento	71
Tabela 4.1 – Consumo de MPN (em kg/ton de cimento) na moagem de cru, por tipo de cimento	75
Tabela 4.2 – Consumo de MPS (em kg/ton de cimento) na moagem de cru, por tipo de cimento	76
Tabela 4.3 – Consumo de produtos minerais (em kg/ton de cimento) na moagem de cimento, por tipo de cimento	76
Tabela 4.4 – Consumo de MPS (em kg/ton de cimento) na moagem de cimento, por tipo de cimento	77
Tabela 4.5 – Consumo de energia térmica (em MJ/ton de cimento), por tipo de cimento	78
Tabela 4.6 – Consumo de energia elétrica (em kWh/ton de cimento) por tipo de cimento	79
Tabela 4.7 – Consumo de água subterrânea (em m <sup>3</sup> /ton de cimento) por tipo de cimento	79
Tabela 4.8 – Consumo de cargas explosivas (em kg/ton de cimento) por tipo de cimento	80
Tabela 4.9 – Consumo de materiais de empacotamento (em unidade) por tipo de cimento	80
Tabela 4.10 – Transporte de produtos e combustíveis (em kg/ton de cimento) por tipo de cimento	80
Tabela 4.11 – Emissão de CO <sub>2</sub> (em kg/ton de cimento) por tipo de cimento	81
Tabela 4.12 – Emissão de partículas (em g/ton de cimento) por tipo de cimento	81
Tabela 4.13 – Emissão de poluentes atmosféricos (em g/ton de cimento) por tipo de cimento	82
Tabela 4.14 – Produção de RIB e RIP (em kg/ton de cimento), por tipo de cimento produzido	83

Tabela 4.15 – Consumo de MPN (em kg/ton de cimento) na produção de energia primária .....	83
Tabela 4.16 – Consumo de combustíveis fósseis (em kg/ton de cimento) na produção de energia primária .....	83
Tabela 4.17 – Emissões atmosféricas (em kg/ton de cimento) geradas pela produção de energia primária .....	84
Tabela 4.18 – Consumo de combustíveis fósseis (em kg/ton de cimento) nas etapas de transporte ..	84
Tabela 4.19 – Emissões atmosféricas (em kg/ton de cimento) geradas nas etapas de transporte .....	85
Tabela 4.20 – Resultados da caracterização dos indicadores de impacto, discriminados pelo sistema de produto principal e os subsistemas associados .....	87
Tabela 4.21 – Resultados dos indicadores relativos à depleção de recursos abióticos por ton de cimento produzida .....	88
Tabela 4.22 – Resultados do indicador relativo às alterações climáticas e aquecimento global por ton de cimento produzida .....	88
Tabela 4.23 – Resultados do indicador relativo à depleção da camada de ozono estratosférico por ton de cimento produzida .....	89
Tabela 4.24 – Resultados da avaliação do potencial de acidificação por ton de cimento produzida ...	89
Tabela 4.25 – Resultados da avaliação do potencial de eutrofização por ton de cimento produzida...	90
Tabela 4.26 - Resultados da avaliação do potencial de oxidação fotoquímica por ton de cimento produzida.....	90
Tabela 4.27 – Resultados da avaliação do potencial de toxicidade para a saúde humana por ton de cimento produzida .....	91
Tabela 4.28 – Resultados da avaliação da ecotoxicidade para sistemas dulçaquícolas por ton de cimento produzida .....	91
Tabela 4.29 – Resultados da avaliação da ecotoxicidade para sistemas marinhos por ton de cimento produzida .....	92
Tabela 4.30 – Resultados da avaliação da ecotoxicidade para sistemas terrestres por ton de cimento produzida .....	92

Tabela 4.31 – Resultados normalizados dos indicadores de impacto para a produção de 1 ton de <i>CEM I</i> 42,5 e de <i>CEM II</i> 32,5 .....	95
---	----

## Lista de siglas e acrónimos

ACV – Análise de ciclo de vida

AICV – Avaliação de impacte do ciclo de vida

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

BCG – *Boston Consulting Group*

CDR – Combustível derivado de resíduos

CE – Comissão Europeia

CEM – *Cement*

CEN – *European Committee for Standardization*

CFC – Clorofluorcarbonetos

CSI – *Cement Sustainability Initiative*

DA – Declaração Ambiental

DAP – Declaração Ambiental de Produto

EC – European Commission

ECRA – *European Cement Research Academy*

EEA – *European Environment Agency*

EEE – Espaço Económico Europeu

EMAS – Sistema Comunitário de Ecogestão e Auditoria

EMEP/EEA – *European Monitoring and Evaluation Programme/European Environment Agency*

EPD – *Environmental Product Declaration*

GEE – Gases efeito de estufa

HFC - Hidrofluorcarbonetos

IBU – *Institut Bauen und Umwelt*

ICCA – *International Congress and Convention Association*

ICV – Inventário de ciclo de vida

IFC – *International Finance Corporation*

ISO – *International Organization for Standardization*

LA – Licença Ambiental

MIRR – Mapa Integrado de Registo de Resíduos

MPN – Matérias-primas naturais

MPS – Matérias-primas secundárias

MTDS – Melhores técnicas disponíveis

NE – Norma Europeia

PFC – Pó de forno de clínquer

PIB – Produto Interno Bruto

RAA – Relatório Ambiental Anual

RCLE – Regime Comunitário de Licenças de Emissão

RIB – Resíduos industriais banais

RIP – Resíduos industriais perigosos

SETAC – *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*

SGA – Sistema de Gestão Ambiental

SPOLD – *Society for Promotion of Life-cycle Assessment Development*

TIC – Taxa de incorporação de clínquer

UNEP – *United Nations Environment Programme*

WBCSD – *World Business Council for Sustainable Development*

# 1 Introdução

O crescimento demográfico e a necessidade de infraestruturas têm promovido uma maior produção e consumo de cimento. Contudo, o seu processo de fabrico é responsável por pressões ambientais que já não são aceites incondicionalmente, tendo em conta a crescente preocupação com a deterioração dos sistemas naturais. A implementação de um sistema económico circular na rede de indústrias europeias pretende minimizar a exploração massiva de recursos naturais e o consumo excessivo de combustíveis fósseis, característicos da indústria cimenteira. Este capítulo compreende o enquadramento do tema desenvolvido neste trabalho e a apresentação dos objetivos definidos. É ainda feito um resumo da metodologia aplicada e apresentada a estrutura da dissertação.

## 1.1 Enquadramento e Relevância do Tema

O cimento é o principal constituinte do betão, o segundo material mais utilizado no mundo. Em consequência de um contínuo crescimento demográfico e da consequente necessidade de infraestruturas, os ritmos de consumo e fabrico deste produto são cada vez mais rápidos. Contudo, esta relação é recíproca; tal como a variação demográfica de uma sociedade influencia os níveis de produção de cimento também estes contribuem com postos de trabalho e benefícios económicos para indústrias que dependam do seu produto e/ou serviços (Mishra & Siddiqui, 2014).

A produção de cimento compreende necessidades materiais e energéticas muito elevadas - baseia-se na extração e transformação de matérias-primas naturais (MPN) através da sua exposição a condições de temperatura extremas, atingidas através do consumo elevado de combustíveis. Desde a exploração de recursos naturais até à emissão atmosférica de gases efeito de estufa (GEE) e outros poluentes, a indústria cimenteira representa uma parte significativa da deterioração da qualidade dos ecossistemas causada por processos antropogénicos. Atualmente, é confrontada pelas problemáticas de escassez de reservas de combustíveis fósseis e de matérias-primas (Imbabi *et al.*, 2012); porém, os níveis de produção de cimento apresentam uma tendência crescente nas principais potências mundiais, o que amplifica o impacto ambiental da indústria cimenteira (Uwasu *et al.*, 2014).

Segundo a WBCSD-CSI (2012), a indústria cimenteira é responsável por cerca de 5% das emissões anuais de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) provenientes de fontes antrópicas. Apesar das melhorias que têm sido implementadas no processo de produção com vista à mitigação do seu impacto no ambiente, como a utilização de matérias-primas e combustíveis alternativos, a contribuição do cimento para o agravamento do aquecimento global e consequentes alterações climáticas ainda é das mais alarmantes.

Inicialmente, a evolução do cimento foi condicionada essencialmente por fatores económicos e sociais; acidentalmente, resultavam benefícios ambientais das alterações aplicadas. Contudo, com a explosão do movimento ambientalista nos anos 60, a indústria cimenteira foi obrigada a adaptar-se às exigências da sociedade e do mercado e incorporar as preocupações ambientais no seu processo de decisão (van Oss & Padovani, 2002; Rome, 2003). As consequências ambientais do processo produtivo das indústrias do cimento já não podiam ser preteridas em prol do crescimento industrial e económico, nem era possível ignorar que “num mundo finito, o modelo de crescimento ilimitado, de consumo livre de recursos naturais e de poluição descontrolada, corresponde a uma receita para a autodestruição do planeta” (Mehta, 2001).

Em 2014, a Comissão Europeia (CE) apresentou um projeto de transformação dos processos industriais e económicos lineares em ciclos de produção, interligados pela reutilização, recuperação e reciclagem de resíduos e produtos. Os principais objetivos são contrariar a dependência da economia europeia em relação aos fornecedores externos de matérias-primas e a sua suscetibilidade à variabilidade dos mercados e estados sociopolíticos desses países (EC, 2015a). São propostas medidas e estratégias de valorização de recursos e resíduos ao longo da cadeia de valor, que permitam minimizar, respetivamente, o seu consumo e a sua produção (EC, 2015b).

O programa de transformação da rede de processos económicos num sistema económico circular exige que sejam estabelecidas relações entre as várias etapas que compõem os ciclos de produção: desde a extração de matérias-primas; passando pelo seu processamento, *design* e produção do produto final; até à distribuição deste, à sua utilização e posterior reciclagem (EC, 2015a). A ferramenta de análise do ciclo de vida (ACV) permite a avaliação integrada de cada uma destas etapas com base nos fluxos ambientais que compreendem. O estudo da dinâmica dos fluxos de entrada e saída de cada estágio do ciclo de vida do produto permite identificar não só aspetos a melhorar no processo de produção como também oportunidades de interligação com outros processos produtivos. Os resíduos de uma indústria podem ser reutilizados em processos de valorização material ou energética numa outra linha de produção, e mesmo os produtos finais, já na fase de resíduo, podem ser reintroduzidos no ciclo de produção em que tiveram origem na forma de matérias-primas. A ACV complementa a estratégia para uma economia circular com *insight* sobre o funcionamento e dinâmica dos processos produtivos, e a sua predisposição para este novo sistema económico.

O cimento compreende um processo de produção disponível para a cooperação com outras indústrias através da incorporação de resíduos e coprodutos na forma de matérias-primas secundárias (MPS) e combustíveis alternativos. Estas medidas, alusivas aos princípios da economia circular, já se encontram em vigor na indústria cimenteira com o objetivo de minimizar custos e impactes ambientais. A própria gama de produtos já inclui categorias específicas para cimentos que contenham na sua composição MPS. É necessário comprovar as vantagens da substituição dos produtos cimentícios convencionais pelos designados “cimentos *green*” e promover a sua fixação nos mercados como o novo produto-padrão.



## 1.2 Objetivos e Âmbito

O objetivo da presente dissertação é provar que, entre dois tipos de cimento – *Portland* comum e *Portland* compósito – produzidos na fábrica de cimento Secil-Outão, o cimento compósito apresenta um melhor desempenho ambiental. A decisão é suportada por um estudo *cradle-to-gate* do ciclo de vida de ambos os produtos, organizado em duas partes: a comparação dos consumos e emissões associados ao fabrico de cada produto – inventário do ciclo de vida (ICV) – e a comparação dos efeitos ambientais dos respetivos sistemas de produção – avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV).

O cumprimento do objetivo definido de acordo com uma abordagem de ciclo de vida permitirá a análise e determinação do desempenho ambiental dos produtos analisados num contexto mais próximo da realidade. São tidos em conta tanto os impactes diretos, associados ao processo de produção desenvolvido na fábrica do Outão, como os indiretos, associados aos sistemas tecnológicos que fornecem os seus produtos para o fabrico do cimento.

Atualmente, a importância atribuída a regulamentos ambientais, tanto por produtores como consumidores, apresenta uma tendência crescente. Em contexto nacional, a competitividade dos produtos está longe de ser determinada pelo seu desempenho ambiental, ao qual não é atribuída tanta importância comparativamente à sua performance técnica e/ou económica. Para além disso, a ACV é um método de análise do desempenho ambiental que exige o dispêndio de tempo e capital caso se pretenda construir um estudo consistente sobre os efeitos ambientais do fabrico dos produtos em análise; tempo e capital que podem ser utilizados no melhoramento de outros aspetos do produto, mais perceptíveis para o consumidor.

Porém a aposta e o crescimento da Secil no mercado internacional, impulsionam o investimento em novos métodos de apresentação e promoção dos seus produtos. A ACV suporta o *marketing* de produtos com base nas suas vantagens a nível ambiental e consegue apresentar essa informação de forma transparente e acessível. A aplicação desta ferramenta no caso da Secil-Outão permitirá realçar os benefícios ambientais e económicos do fabrico de cimentos compósitos e apoiar a aposta da empresa na sua produção. A ACV consistirá numa prova científica do desempenho ambiental superior do cimento *Portland* compósito produzido na fábrica do Outão, e num meio de promover a competitividade da empresa na indústria cimenteira.

## 1.3 Metodologia geral

Em primeiro lugar foi desenvolvida uma pesquisa relativamente aos temas abordados no trabalho. A revisão teórica realizada foi dividida em duas componentes principais correspondentes à ferramenta aplicada, a ACV, e ao objeto de estudo, o cimento.

A metodologia aplicada no presente trabalho foi desenvolvida com base nos requisitos e linhas orientadoras presentes nas normas da *International Organization for Standardization* (ISO), em normas europeias e apoiada por literatura científica relacionada com os assuntos em análise. Foram definidos os objetivos do estudo e realizado o enquadramento do mesmo, seguido da descrição do sistema a analisar e dos procedimentos aplicados no desenvolvimento do ICV e da AICV.

Através da aplicação da metodologia descrita foram obtidos os resultados do ICV e da AICV relativamente ao sistema de produto do cimento, respetivamente organizados por categorias de fluxos e indicadores de impacto.

Por último, foi desenvolvida uma revisão do trabalho realizado não só relativamente aos resultados obtidos e aspetos significativos como também à metodologia aplicada e construídas as principais conclusões.

#### **1.4 Organização da dissertação**

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos:

- 1. Introdução** – Consiste no enquadramento do trabalho, os objetivos do seu desenvolvimento e uma síntese da sua organização e conteúdos.
- 2. Revisão da Literatura** – Expõe os princípios teóricos dos temas abordados. Primeiramente é feita a descrição dos conceitos e fundamentos principais da ferramenta de ACV, bem como da sua metodologia. De seguida é feita a caracterização da indústria cimenteira e do cimento, complementada pela descrição do processo de fabrico, dos fluxos que compreende e dos impactos ambientais pelos quais é responsável.
- 3. Metodologia** – Compreende a apresentação do caso de estudo da fábrica Secil-Outão e a sua caracterização. Segue-se a descrição detalhada dos estágios de desenvolvimento do trabalho, baseados nas principais etapas da execução de uma ACV.
- 4. Resultados e Discussão** – Inclui a apresentação dos resultados das componentes de inventário e de avaliação de impacto relativamente à produção dos cimentos estudados. A discussão dos resultados obtidos envolve a comparação e análise dos fluxos e dos indicadores de impacto ambiental.
- 5. Conclusões** – Envolve a revisão crítica do trabalho desenvolvido e dos resultados obtidos, com a determinação dos aspetos mais significativos da ACV e o cumprimento dos objetivos propostos. São apontadas as limitações do estudo desenvolvido e sugestões para desenvolvimentos futuros.

## 2 Revisão da Literatura

A execução da ACV do cimento exigiu o desenvolvimento de uma pesquisa relativa aos fundamentos teóricos da ferramenta de gestão ambiental, do produto em estudo e respetivo processo de produção. A ACV aborda a determinação dos impactes ambientais da produção de um bem ou serviço de acordo com uma perspetiva integrada das diferentes fases do processo de fabrico, tendo em conta a interação entre sistemas e entre estes e o ambiente. O cimento é o material de construção mais comum e é responsável por pressões ambientais diversas desde o consumo intenso de recursos naturais, materiais e energia, até à emissão significativa de CO<sub>2</sub> e outros GEE. A revisão teórica dos princípios e metodologia da ACV é apresentada no ponto 2.1; o cimento e o seu processo de produção são descritos no ponto 2.2.

### 2.1 Análise do Ciclo de Vida

#### 2.1.1 Conceito

A ACV é uma abordagem de avaliação dos impactes ambientais decorrentes das diferentes etapas do ciclo de vida de determinado bem ou serviço. Tem como base a identificação e quantificação de todos os fluxos de entrada (*inputs*) e saída (*outputs*) que lhe estejam associados (Ding, 2014). É uma ferramenta de gestão ambiental que permite aferir sobre o desempenho ambiental de um produto ou serviço, através de uma análise holística dos efeitos ambientais da sua produção.

Este método tem como princípio fundamental o facto de a partir de todos os processos do ciclo de vida do produto resultarem impactes ambientais, em consequência do consumo de recursos e da produção de efluentes de poluição (Papadakis, 2006). Posto isto, a ACV exige uma decomposição do ciclo de vida do produto nas suas diferentes fases, ainda que a avaliação dos *inputs* e *outputs* de cada uma seja desenvolvida de forma integrada.

Os limites em que a ACV é desenvolvida suportam a sua caracterização como uma análise *cradle-to-grave*, i.e., do berço ao túmulo, sendo este um dos aspetos que a distingue das restantes ferramentas de avaliação de impacto (Klöpffer, 2014). Este tipo de estudos tem em conta todo o percurso do bem ou serviço em causa, desde a extração da matéria-prima (berço), o seu processamento e utilização no processo produtivo, até à aplicação do produto final e ao tratamento e destino final do seu resíduo (túmulo) (ISO, 2006a).

A aproximação da ACV à realidade de um processo de produção não termina no estudo integrado de todos os processos que o compõem e daqueles com os quais interage. Os fluxos de entrada e saída

são normalizados em relação à função do bem ou serviço através da definição de uma unidade funcional; este elemento da ACV permite o cálculo objetivo dos consumos e emissões alocados ao produto em estudo (Alcobia, 2009; Klöpffer, 2014).

A aplicação principal da ACV é a identificação, quantificação e avaliação dos impactes ambientais decorrentes do ciclo de vida de um produto. Esta ferramenta permite ainda quantificar e analisar os aspetos ambientais do produto e, assim, caracterizar o seu desempenho ambiental (ISO, 2006a). Os resultados obtidos contribuem para o desenvolvimento e otimização de produtos, facilitam a identificação de oportunidades de melhoria no processo de fabrico, suportam a comparação entre produtos alternativos, o planeamento estratégico da organização e processos de tomada de decisão, servem de base a outras ferramentas de marketing e *benchmarking* ambiental e apoiam a criação de políticas ambientais (Ding, 2014; EEA, 1997).

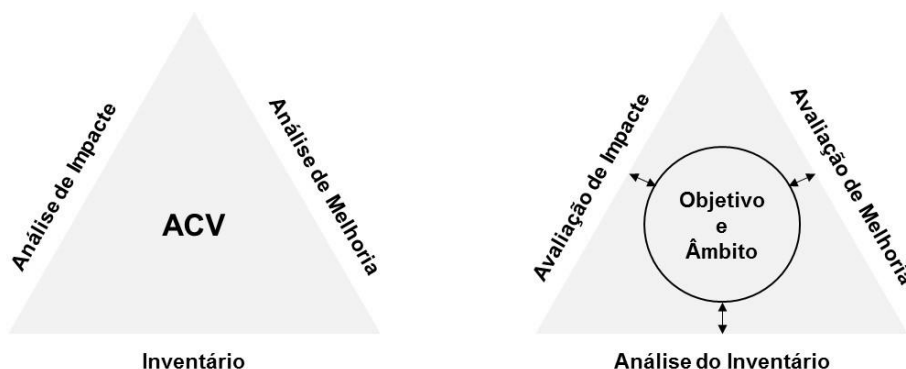
A incorporação da ACV nos processos internos das organizações é benéfica tanto em fases mais a montante como mais a jusante da produção do produto. Todavia a primeira situação permite minimizar antecipadamente os impactes ambientais e salvaguardar a qualidade do produto. A jusante, a ACV realça a sustentabilidade ambiental do bem ou serviço no mercado através de Rótulos Ecológicos, e suporta a comparação de produtos alternativos por meio de Declarações Ambientais de Produto (DAP) (EEA, 1997). Apesar de variadas, as utilidades desta ferramenta convergem no objetivo comum de minimizar e solucionar o consumo descontrolado de recursos e a produção excessiva de poluição.

### 2.1.2 História

Entre o final dos anos 60 e o início dos anos 70, surge a forma primitiva da ACV, na altura designada por Análise do Perfil Ambiental e de Recursos (Ferreira, 2004). Segundo Klöpffer (2014), eram constituídas por um ICV e uma AICV rudimentares, sendo o principal foco os consumos energéticos e materiais e não os efluentes do processo produtivo. Tinha como principal área de aplicação a indústria de produção de embalagens, tendo sido no seu âmbito que foram desenvolvidos os primeiros estudos. Em 1969, a Coca-Cola encomendou ao *Midwest Research Institute* um estudo comparativo dos recursos, emissões e resíduos associados à produção de garrafas de plástico e de vidro. Na Europa, um projeto contemporâneo designado por *Ecobalance* consistiu na compilação do consumo energético do processo de fabrico de embalagens de bebidas tendo em conta diferentes materiais, como o plástico e o metal (EEA, 1997).

A crise energética dos anos 70 alimentou a preocupação com o consumo de energia, que procurou na ACV um método de prever e minimizar as necessidades energéticas dos processos produtivos. Com o desaparecimento dos efeitos da escassez de petróleo, esta ferramenta perde procura. A ACV recupera reconhecimento com os movimentos ambientalistas e a criação de políticas verdes nos anos 90 (Lage, 2014). O crescente interesse por esta ferramenta e a expansão do foco da sua aplicação para lá do consumo energético, levam a *Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC)* a

desenvolver a base da metodologia de ACV. Entre 1991 e 1993, a *SETAC* apresentou duas estruturas de ACV, representadas no esquema da Figura 2.1.



**Figura 2.1** – Estrutura da ACV em 1991 (à esquerda) e em 1993 no Código de Prática da *SETAC* (à direita) (fonte: adaptado de Klöpffer, 2014)

A estrutura da ACV proposta pela *SETAC* em 1991 (à esquerda) consistia em três componentes fundamentais: o Inventário, a Análise de Impacte e a Análise de Melhoria. A primeira versão, com grande ênfase na metodologia do ICV, foi revista após a primeira Conferência Mundial da *SETAC* em Lisboa, Portugal (Klöpffer, 2014). Das alterações executadas resultaram o Código de Prática da *SETAC* e uma nova estrutura de ACV (à direita). Para além de alterações ao nível da designação das principais componentes, a estrutura apresentada no Código de Prática da *SETAC* compreendia uma nova componente de planeamento da ACV. No elemento de Objetivo e Âmbito deviam ser explicitados os objetivos do estudo e apresentado o enquadramento do mesmo. Tendo em conta que a metodologia do ICV foi desenvolvida com rigor na versão anterior, o principal foco da segunda versão foi a AICV (Klöpffer, 2014).

Com a finalidade de agilizar a fixação de uma metodologia ACV e promover a sua aplicação como uma ferramenta de gestão e de apoio à decisão (Ferreira, 2004), em 1992, foi criada a *Society for Promotion of Life-cycle Assessment Development (SPOLD)*. No mesmo ano a *ISO* criou uma equipa responsável pela normalização de várias ferramentas de gestão ambiental, nomeadamente, a ACV. Em 1997, a *ISO* definiu os princípios metodológicos base de uma ACV, e publicou-os como parte da família das normas *ISO 14000*. Este conjunto de normas inclui ferramentas de gestão passíveis de serem aplicadas por organizações interessadas em avaliar os seus aspetos e desempenho ambientais (ISO, 2009).

A primeira norma a ser publicada foi a *ISO 14040:1997* que incluía toda a informação sobre o modelo de desenvolvimento de uma ACV. Após a sua revisão em 2006, o conteúdo da *ISO 14040:1997* foi organizado em duas normas: *ISO 14040:2006* e *14044:2006* (Klöpffer, 2014). Enquanto a primeira abrangia os princípios e a estrutura da ACV, a segunda focava os requisitos e diretrizes a respeitar para desenvolver uma ACV segundo as normas *ISO*. Através das normas *ISO 14040:2006* e *14044:2006* há uma uniformização dos estudos de ACV e, conseqüentemente, uma maior facilidade em comparar e relacionar os seus resultados.

Segundo ISO (2015), as normas internacionais em vigor com conteúdo relativo à ACV de produtos e serviços, são as seguintes:

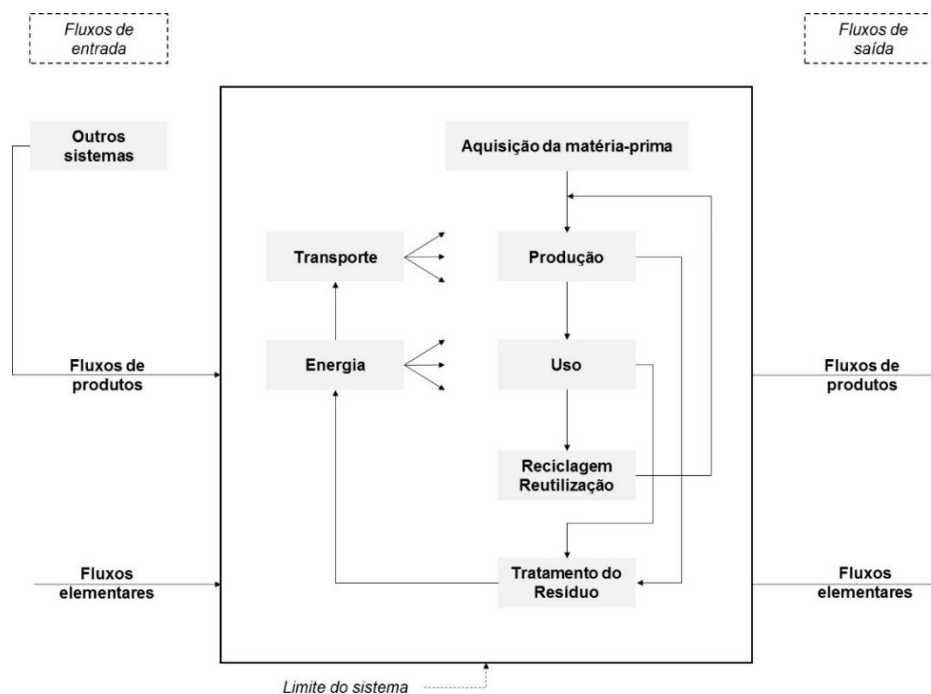
- **ISO 14040:2006** – Princípios e estrutura da ACV;
- **ISO 14044:2006** – Requisitos e diretrizes para a ACV;
- **ISO/TR 14047:2012** – Exemplos de aplicação da norma ISO 14044 a avaliações de impacto;
- **ISO/TS 14048:2002** – Formato do registo e documentação de dados (revisão em 2013);
- **ISO/TR 14049:2012** – Exemplos de aplicação da ISO 14044 ao nível da definição de objetivos e âmbito e da análise de inventário.

Em 2014 foram publicadas as normas ISO/TS 14071:2014 e ISO/TS 14072:2014 também relacionadas com a ferramenta de ACV. A primeira apresenta os requisitos adicionais a ter em conta no processo de revisão da ACV e as competências a procurar num revisor externo; a segunda define os requisitos e diretrizes a seguir no desenvolvimento de uma ACV organizacional (ISO, 2015).

A estrutura de ACV definida pelas normas ISO 14040:2006 e 14044:2006 foi considerada como o modelo a seguir na execução de qualquer ACV a produtos ou serviços; contudo, ocorreram desenvolvimentos na área: em 2002, a SETAC em conjunto com a *United Nations Environment Programme (UNEP)* formou a *UNEP/SETAC Life Cycle Initiative*, responsável por identificar as melhores técnicas disponíveis (MTDS) na área da ACV (Guinée, *et al.*, 2004). Do trabalho conjunto das duas organizações resultaram também as metodologias da Gestão do Ciclo de Vida e da Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida.

### 2.1.3 Descrição

A ACV consiste na compilação e avaliação das entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) e potenciais impactos ambientais associados ao ciclo de vida de um sistema de produto (ISO, 2006a). O objeto de estudo de uma ACV, segundo Klöpffer (2014), não é apenas o bem ou serviço visível ao consumidor, mas sim todos os processos e fluxos que ocorrem a montante e jusante da sua utilização. Todos estes elementos compõem o sistema de produto (Figura 2.2).



**Figura 2.2** – Esquema exemplo de um sistema de produto (fonte: adaptado de ISO, 2006a)

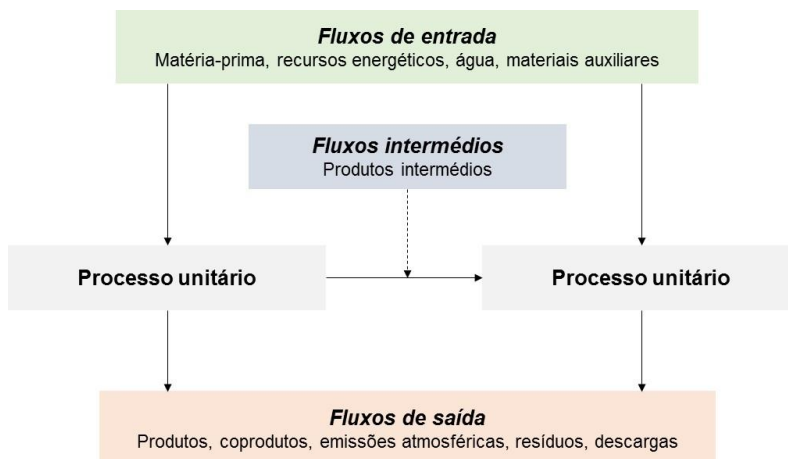
O sistema de produto inclui o leque de processos que ocorrem ao longo da vida do produto, as etapas principais e as secundárias, como o transporte de recursos e o fornecimento de energia. Segundo Alcobia (2009), o ciclo de vida inclui as seguintes etapas:

- **Aquisição da matéria-prima** – Inclui todos os processos que envolvam a extração de matéria-prima diretamente do ambiente, bem como os recursos consumidos e as emissões geradas;
- **Produção** – Abrange o processamento e utilização da matéria-prima, a fabricação do produto final, o seu acondicionamento e expedição;
- **Uso** – Consiste na aplicação real do produto para cumprimento de uma das suas funcionalidades e quaisquer processos de manutenção;
- **Reciclagem/reutilização e tratamento do resíduo** – Correspondem à etapa de fim-de-vida do produto. São processos alternativos dependentes das propriedades do produto; a recuperação do resíduo permite a sua reintrodução no processo de produção como matéria-prima, enquanto o seu tratamento resulta na deposição em aterro ou na sua valorização energética.

São também tidos em conta todos os recursos que entram no sistema e o seu transporte, bem como os resíduos e emissões resultantes. Os fluxos de entrada e saída são classificados como fluxos elementares ou de produto, consoante a interferência humana na sua produção. Segundo a ISO (2006a), os recursos que entrem no processo diretamente a partir do ambiente, ou que saiam do sistema de produto sem qualquer tipo de gestão ou tratamento posteriores, designam-se por fluxos elementares; os fluxos de produtos correspondem a recursos que entram no sistema de produto

diretamente a partir de outro. Todos os processos que ocorram fora do limite do sistema, não são considerados na ACV.

Cada uma das fases do sistema de produto é composta por processos unitários, i.e., o elemento básico de uma ACV (ISO, 2006a). A estes processos são associadas fluxos de entrada, de saída e intermédios (Figura 2.3).



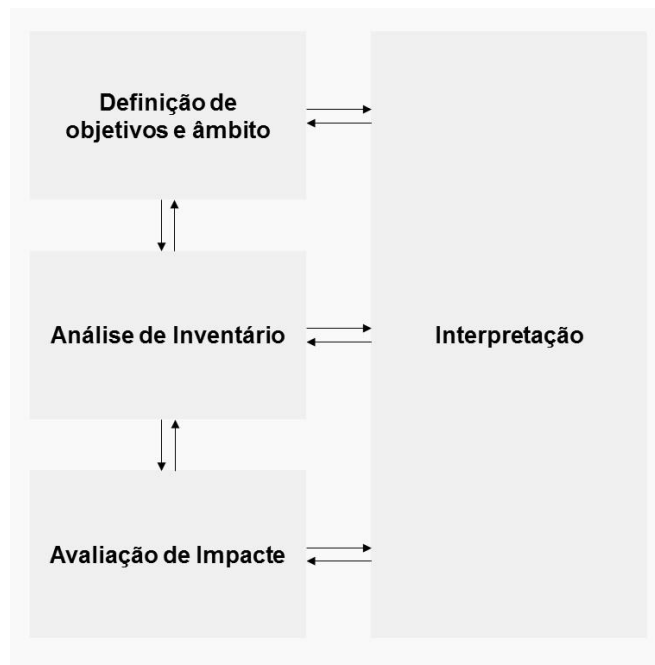
**Figura 2.3** – Esquema representativo dos fluxos associados aos processos unitários

Os *inputs* correspondem a recursos materiais e energéticos, enquanto os *outputs* consistem nos resíduos, nas emissões e nos produtos e coprodutos resultantes do processo. Entre os processos unitários ocorrem ainda fluxos intermédios que dizem respeito aos produtos intermédios do processo de produção. A análise detalhada dos fluxos de cada processo unitário, nas várias etapas do ciclo de vida do produto, é o cerne da ACV. A sua quantificação permite determinar as pressões ambientais decorrentes do sistema.

#### 2.1.4 Metodologia

A metodologia de ACV abrange um conjunto de componentes que asseguram o planeamento, desenvolvimento e conclusão do estudo. Por esta ordem, os quatro elementos são: definição do objetivo e âmbito; análise de inventário; avaliação de impacto; e interpretação. A estrutura da ACV representada na Figura 2.4 segue os requisitos das normas ISO.





**Figura 2.4 – Estrutura da ACV segundo as normas ISO (fonte: adaptado de ISO, 2006a)**

A abordagem aplicada na elaboração da ACV condiciona os procedimentos teóricos e práticos definidos nas várias etapas. A ACV pode seguir uma abordagem atributiva ou consequencial. A abordagem atributiva compreende a modelação e descrição dos fluxos ambientais relevantes associados ao sistema de produto, considerando que este não é influenciado nem influencia outros sistemas (EC, 2010). Relativamente aos processos principais é utilizada informação específica atual ou passada, enquanto os processos secundários são caracterizados com base em dados genéricos. A abordagem consequencial consiste na modelação das consequências de uma decisão para os fluxos ambientais do sistema de produto (EC, 2010). Descreve um sistema hipotético, com base nos efeitos da decisão no sistema principal e em quaisquer outros sistemas que lhe estejam associados.

a. Definição de objetivos e âmbito

A primeira componente da ACV é essencial para o planeamento e enquadramento do estudo. Segundo a USEPA (2006), deve ser desenvolvida segundo as seguintes etapas: definição dos objetivos; definição do tipo de informação a comunicar aos decisores; determinação da especificidade dos dados; organização dos dados e apresentação dos resultados; e definição do âmbito do estudo.

O primeiro estágio compreende a definição da finalidade da ACV, i.e., as razões que justificam o seu desenvolvimento. Deve ser também estabelecido qual o público-alvo dos seus resultados e se estes serão ou não disponibilizados para consulta e apreciação de entidades externas (interessados, clientes, competidores) (ISO, 2006a). Os objetivos da ACV são geralmente classificados em objetivo principal e objetivos secundários, respetivamente, de carácter mais prático (relativo ao produto e ao seu processo

de produção) e mais estratégico (relativos ao suporte de processos de tomada de decisão e desenvolvimento de regulamentos). Os objetivos servem de base ao âmbito da ACV, que por sua vez enquadra a análise do inventário e a avaliação de impacto, razão pela qual devem ser definidos inicialmente (EC, 2010).

A par dos objetivos do estudo, devem ser definidas as questões às quais a entidade interessada pretende que a ACV responda, desde questões relativas ao produto até a problemas relacionadas com uma etapa do processo de produção ou com o processo em geral (USEPA, 2006). Posteriormente, é necessário identificar qual a informação necessária para alcançar esse objetivo e adaptar a metodologia e os critérios de desenvolvimento da ACV (Alcobia, 2009).

Segundo a USEPA (2006), a especificidade da informação recolhida varia consoante a ACV tem uma aplicação genérica, como para responder a um problema de interesse público ou avaliar o impacto ambiental de um setor industrial, ou uma aplicação específica, ao nível de uma organização e dos seus produtos e processos. Quanto menor a especificidade dos dados mais fácil é a sua recolha mas menor a representatividade da realidade (Alcobia, 2009), o que não se adequa a ACV de produtos ou processos de produção.

A informação recolhida deve ser processada e organizada tendo como referência a unidade funcional do sistema de produto. Para efeitos de comparação de dois sistemas, a unidade funcional deve ser definida de modo a que as funções de ambos sejam equivalentes. Por exemplo, no estudo desenvolvido em 2006 por Edwards & Fry (2011), para a *United Kingdom Environmental Agency (UK-EA)*, relativamente a sacos de supermercado de diferentes materiais, foi definido como unidade funcional o transporte de compras durante um mês.

Por último é realizado o enquadramento do estudo. O âmbito da ACV corresponde à descrição detalhada do sistema de produto. Segundo a ISO (2006a), esta componente deve conter os seguintes itens: identificação do sistema de produto e das suas funções, ou dos sistemas caso se trate de uma análise comparativa; a unidade funcional; o fluxo de referência; os limites do sistema; procedimentos de alocação; as categorias de impacto ambiental, a metodologia de análise de impacto e o método de interpretação; requisitos dos dados; pressupostos; limitações; requisitos iniciais de qualidade dos dados; tipo de revisão crítica; tipo e formato do relatório do estudo.

Após a identificação do sistema de produto e das suas funções é definida a unidade funcional que permitirá a comparação de sistemas de produto através da normalização do fluxo de referência, i.e., a quantidade de produto necessária para concretizar a unidade funcional. Por sua vez, através do fluxo de referência, são uniformizados os *inputs* e *outputs* do sistema (EC, 2010).

O âmbito inclui também a definição dos limites do sistema. Este item define os processos unitários que serão tidos em conta na ACV; geralmente, está de acordo com o carácter *cradle-to-grave* do estudo, pelo que são incluídas todas as fases da vida do produto (ISO, 2006a). O processo de determinação dos limites do sistema deve ter em conta os limites entre o sistema de produto e o ambiente e os limites

entre o sistema de produto e a tecnosfera (outros sistemas de produção) (Alcobia, 2009). A ACV deve ser limitada aos processos e fluxos que contribuem significativamente para o sistema de produto. Posto isto, certas etapas e fluxos podem ser excluídos do estudo quando estes não afetam significativamente os resultados, ou não têm relevância tendo em conta os objetivos do estudo. Na comparação de produtos, certas etapas comuns podem ser excluídas desde que sejam completamente equivalentes (Alcobia, 2009).

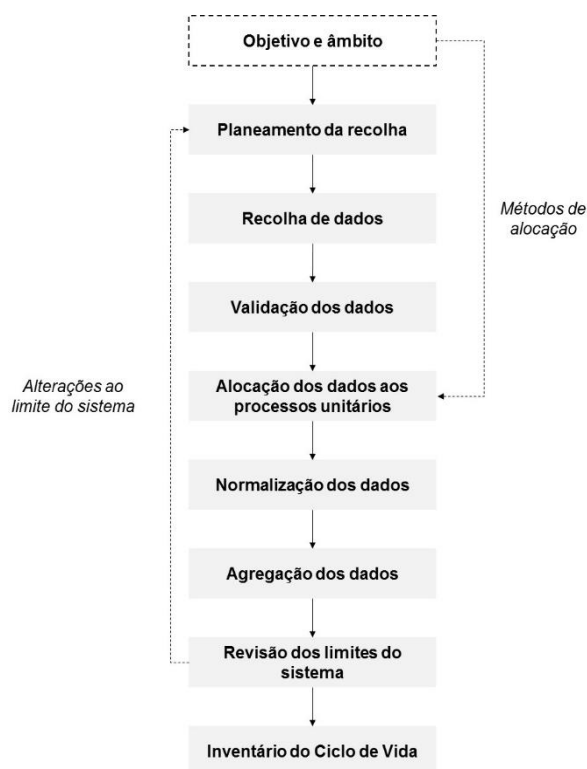
No caso do sistema de produto possuir mais do que uma função, produtos secundários ou sistemas internos de reciclagem, devem ser aplicados procedimentos específicos. Primeiramente deve garantir-se que não é possível separar a linha de produção do produto secundário da do produto principal, por fragmentação do processo ou expandir o sistema de modo a incluir os processos que permitem caracterizar a função secundária (USEPA, 2006). Caso não seja possível, deverão ser definidos procedimentos de alocação (EC, 2010). A alocação consiste na divisão dos fluxos de entrada e saída do processo pelo produto principal e o coproduto (ISO, 2006a), de acordo com o valor de mercado, o valor económico ou o peso dos produtos.

As categorias de impacto ambiental e a metodologia para a sua avaliação devem ser explicitadas no âmbito da ACV (ISO, 2006a). O conjunto de categorias, para além de consistente com os objetivos do estudo, deve abranger uma variedade relevante de questões ambientais (Ferreira, 2004). Os métodos e princípios que estão na base da interpretação dos resultados também devem ser indicados. Os requisitos dos dados consistem na caracterização da informação compilada, indicando: cobertura temporal; cobertura geográfica; cobertura tecnológica; precisão, integridade e representatividade dos dados; consistência e reprodutibilidade dos métodos utilizados ao longo da ACV; fontes dos dados; incerteza da informação (Ferreira, 2004).

As normas *ISO* não definem regras específicas para a aplicação da ACV a determinado produto. Quaisquer particularidades são estabelecidas nas Regras de Categoria de Produto (RCP) (EPD International, 2015). Estas normas complementam a metodologia *ISO* e servem de base a outras ferramentas de gestão ambiental como os Rótulos Ecológicos e as DAP.

#### **b. Análise do inventário do ciclo de vida**

O ICV consiste na compilação e quantificação dos recursos materiais e energéticos consumidos e dos produtos, coprodutos, resíduos, emissões e descargas gerados, no decorrer do ciclo de vida do produto (Chen, *et al.*, 2014; ISO, 2006a). É uma análise quantitativa e qualitativa detalhada dos fluxos de entrada, de saída e dos fluxos intermédios de todos os processos que ocorrem ao longo da vida do produto. Na Figura 2.5 é representado o fluxograma de desenvolvimento desta componente da ACV.



**Figura 2.5** – Fluxograma de desenvolvimento do ICV segundo as normas ISO  
(fonte: adaptado de ISO, 2006b)

O ponto de partida do ICV é o planeamento da recolha de dados. Esta etapa compreende o desenvolvimento do fluxograma do sistema de produto, com identificação dos processos unitários que o compõem e quaisquer outros sistemas com os quais tenha alguma relação (Ferreira, 2004). O detalhe com que o sistema de produto é representado, varia consoante os objetivos do estudo e a informação disponível, contudo os processos unitários devem ser descritos o mais minuciosamente possível (Alcobia, 2009). A cada um são associados os respetivos fluxos de entrada e de saída. Os *inputs* consistem em matérias-primas, materiais auxiliares, recursos energéticos (combustíveis fósseis, alternativos, eletricidade), água (subterrânea e superficial); os *outputs* incluem emissões atmosféricas (gases, partículas, metais pesados), resíduos (gerados no processo de produção e após a utilização do produto) e descargas para a água e para o solo (com informação relativa a parâmetros de qualidade dos efluentes) (Alcobia, 2009).

Com base no fluxograma do processo de produção é feita a compilação da informação necessária para analisar quantitativamente os processos unitários que o constituem. Devem ser indicadas as fontes de informação, como relatórios técnicos, ambientais, administrativos, livros, revistas e artigos científicos e bases de dados eletrónicas (Alcobia, 2009).

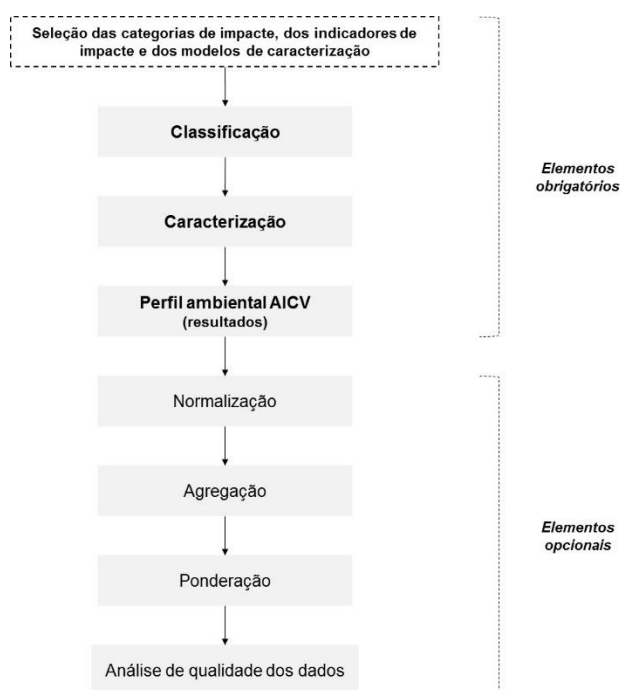
A aprovação dos dados compilados consiste em avaliar se satisfazem ou não os requisitos de qualidade, definidos na componente de definição do âmbito (ISO, 2006b). Os fluxos de entrada e saída de cada processo unitário são normalizados em relação ao fluxo de referência e à unidade funcional (ISO, 2006b), viabilizando a comparação dos resultados de diferentes produtos, se for esse o objetivo.

A agregação de dados ocorre entre entradas e saídas com materiais e substâncias semelhantes ou idênticos, ou que estejam associados aos mesmos impactos potenciais.

Com base nos resultados obtidos e através de uma análise da significância dos processos e fluxos incluídos no sistema principal, os limites do sistema são revistos e redefinidos, se necessário. Desta etapa pode resultar tanto a exclusão de fases do ciclo de vida, processos unitários ou fluxos, como também a inclusão de *inputs*, *outputs* e processos que sejam considerados relevantes para o estudo do sistema de produto (ISO, 2006b).

### c. Avaliação de Impacte

A AICV corresponde ao processo de caracterização e avaliação dos potenciais impactos do sistema de produto, por associação dos fluxos de entrada e saída identificados no ICV a diferentes categorias de impactos no ambiente, na saúde pública e na disponibilidade de recursos (EC, 2010; Ferreira, 2004). A estrutura desta componente da ACV coincide com o representado na Figura 2.7.



**Figura 2.6** – Fluxograma de desenvolvimento da AICV de acordo com as normas ISO  
(fonte: adaptado de ISO, 2006b)

A seleção das categorias de impacto, dos indicadores de impacto e dos modelos de caracterização é feita na etapa de definição do objetivo e âmbito. A definição destes aspetos deve ter em conta os objetivos do estudo e o sistema de produto, de modo a abordarem questões ambientais relevantes para o caso de estudo. De acordo com a ISO (2006a), uma categoria de impacto corresponde a um impacto ou questão ambiental para o qual as cargas ambientais analisadas no ICV podem contribuir; a

quantificação do impacto é representada pelo indicador de impacto. A escolha das categorias e respectivos indicadores é condicionada pela abordagem aplicada na AICV. Segundo Van den Heede & De Belie (2012), existem dois tipos de abordagem:

- **Ao nível do problema** – Focada nos problemas ambientais decorrentes dos *outputs* do sistema de produto, na qual ocorre a quantificação da contribuição de dada emissão para um problema ambiental;
- **Ao nível do dano** – Orientada para o dano real causado por esses problemas, ou seja, é quantificado o efeito efetivo das emissões do sistema de produto.

Cada uma destas abordagens possui modelos de caracterização específicos, representativos dos seus princípios. Estes estabelecem o método de agregação dos resultados do ICV por categoria no caso da abordagem ao nível do dano, enquanto na abordagem ao nível do problema esta etapa mantém-se facultativa (Ferreira, 2004). A conversão ocorre por aplicação de um fator de caracterização que varia de impacto para impacto (ISO, 2006b).

A etapa de classificação consiste na atribuição dos resultados do ICV às categorias de impacto selecionadas, relacionando os fluxos com os problemas ambientais para os quais contribuem (Rønning & Brekken, 2014). Porém os resultados obtidos através da análise do inventário não podem ser utilizados diretamente no desenvolvimento da AICV, sendo o principal obstáculo a contribuição de um fluxo para diferentes impactos. Segundo Ferreira (2004), nos casos em que um fluxo de saída potencia mais do que um impacto ambiental, essa carga ambiental pode ser dividida entre as categorias de impacto (mecanismo paralelo) ou atribuída a todas na sua totalidade (mecanismo em série).

A fase de caracterização consiste no cálculo dos indicadores de impacto, o que permite determinar o peso relativo de cada fluxo em relação a determinado impacto ambiental. O perfil da AICV deve conter os resultados dos indicadores por categoria e indicar se algum processo ou fluxo, analisado no ICV, foi ignorado na avaliação de impacto, justificando a decisão (ISO, 2006b). Os métodos de cálculo dos indicadores também devem ser apresentados.

Segundo a ISO (2006b), os elementos opcionais da avaliação de impacto consistem no seguinte:

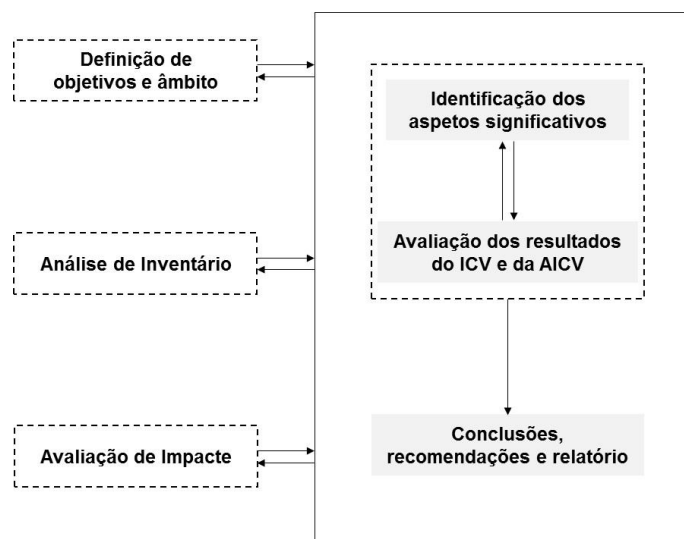
- **Normalização** – Determinação da significância relativa de cada indicador do sistema de produto.
- **Agregação** – Organização das categorias de impacto por emissões, fluxos, escala ou por prioridade (agregação).
- **Ponderação** – Conversão dos resultados dos indicadores utilizando fatores numéricos em vez de fatores científicos, seguida da agregação dos novos indicadores pelas categorias de impacto. O valor resultante da agregação dos resultados corresponde ao desempenho ambiental do produto (Alcobia, 2009).
- **Análise da qualidade de dados** – Avaliação da consistência e coerência dos resultados da AICV.

#### d. Interpretação

A etapa de interpretação corresponde ao processo de formulação das conclusões da ACV através da avaliação integrada dos resultados do ICV e da AICV com os objetivos e o âmbito do estudo (ISO, 2006a). Apesar de teoricamente ser a última fase da ACV, a interpretação está presente ao longo de todo o estudo através de análises recorrentes à qualidade da informação recolhida e dos resultados obtidos. Segundo a USEPA (2006), esta componente da ACV tem como principais objetivos:

- Analisar os resultados, desenvolver conclusões, explicar as limitações do estudo, fazer recomendações relativamente às restantes componentes e comunicar os resultados da ACV de forma transparente;
- Apresentar os resultados de forma perceptível, plena e consistente, enquadrando-os com os objetivos e âmbito do estudo.

O desenvolvimento da componente de interpretação dos resultados da ACV segue os passos representados na Figura 2.7.



**Figura 2.7** – Estrutura da componente de Interpretação da ACV (fonte: adaptado de ISO, 2006b)

A identificação dos aspetos significativos resulta da revisão da informação utilizada para desenvolver as componentes de inventário e de avaliação de impacte e da identificação dos elementos que mais contribuem para os resultados obtidos em ambas as componentes. Segundo a ISO (2006b), a avaliação dos resultados baseia-se em três aspetos:

- **Plenitude** – Assegurar que está presente no estudo toda a informação necessária para a interpretação adequada dos resultados;
- **Sensibilidade** – Verificar se a incerteza dos dados, os métodos de alocação ou as metodologias de cálculo afetam significativamente os resultados e as conclusões finais;
- **Consistência** – Determinar se as suposições, os métodos e os dados são coerentes com os objetivos e o âmbito.

A formulação das conclusões tem por base os resultados da AICV, pelo que inclui a identificação do produto e/ou etapa do processo com maior ou menor impacto no ambiente e na saúde pública (USEPA, 2006). As conclusões finais devem responder às questões levantadas na definição dos objetivos e âmbito e satisfazer os requisitos estabelecidos.

### 2.1.5 Softwares de ACV

As dificuldades inerentes ao desenvolvimento de uma ACV promoveram o desenvolvimento de *softwares* de apoio. Estes programas auxiliam principalmente na execução do ICV e da AICV, disponibilizando bases de dados atualizadas e procedimentos de cálculo de indicadores bem definidos. Os *softwares* de ACV mais utilizados são o SimaPRO e o GaBi, mas ambos exigem a aquisição de uma licença de utilização; atualmente, o openLCA é o único *software* de ACV *opensource*. Na Tabela 2.1 é feita uma descrição sumária dos três programas indicados anteriormente.

**Tabela 2.1** – Descrição sumária dos *softwares* de ACV SimaPRO, GaBi e openLCA

<b>Software</b>	<b>Bases de dados</b>	<b>Descrição</b>
<i>SimaPRO</i>	Ecoinvent Agri-Footprint Inventory Database European Lifecycle Database (ELCD) Input Output Database U.S. Lifecycle Inventory Database (USLCI)	O SimaPRO é um <i>software</i> de ACV profissional, criado pela PRé-Consultants. Tem como principal aplicação a avaliação do desempenho ambiental de produtos para suporte de processos de comparação, desenvolvimento de novos produtos ou políticas. Inclui uma variedade considerável de bases de dados e metodologias de avaliação de impacto, possíveis de editar e expandir ilimitadamente (Alcobia, 2009).
<i>GaBi</i>	GaBi Database Ecoinvent USLCI	O GaBi é uma ferramenta de determinação do desempenho ambiental de produtos, através do processamento de informação e da modelação de todos os elementos do produto numa perspetiva de ACV (GaBi, 2015). As suas principais características são: a modelação por módulos de processos, fluxos ou funcionalidades; e o <i>GaBi web questionnaire</i> que permite a organização, recolha e verificação de dados.
<i>openLCA</i>	Agribalyse* USDA* NEEDS* ELCD* Bioenergiedat* ProBas Ecoinvent GaBi Ökobaudat Social Hotspots LC-Inventories.ch	O openLCA é um <i>software</i> de ACV profissional e gratuito, desenvolvido pela GreenDelta. Inicialmente a sua principal aplicação eram ACV ambientais, mas atualmente inclui outras aplicações (GreenDelta, 2015): custo do ciclo de vida; ACV Social; pegadas de carbono e da água; DAP; rotulagem ambiental (segundo as normas americanas); política integrada de produtos. A sua flexibilidade permite utilizar diferentes bases de dados e metodologias de avaliação de impacto (GreenDelta, 2015).



### 2.1.6 Benefícios e limitações da ACV

A compilação e análise de informação sobre o ciclo de vida de um produto, com posterior determinação dos efeitos ambientais associados, constituem um método que suporta processos integrados de desenvolvimento, comparação e melhoria de bens e serviços.

A comparação entre produtos alternativos é um dos principais processos apoiados pela ACV, essencialmente através da determinação do impacte ambiental associado a cada um. A abordagem holística desta ferramenta de gestão promove a tomada de uma decisão informada (EEA, 1997), relativamente aos impactes que decorrem direta e indiretamente da cadeia de valor do produto, e sólida, suportada por dados científicos e consistentes. Em simultâneo, garante-se a mitigação ou o solucionamento integrado dos impactes identificados, impedindo que ressurjam associados a outro processo ou etapa (ICCA, 2013; Guinée, *et al.*, 2004).

Segundo a USEPA (2006), a aplicação da ferramenta de ACV tem os seguintes benefícios:

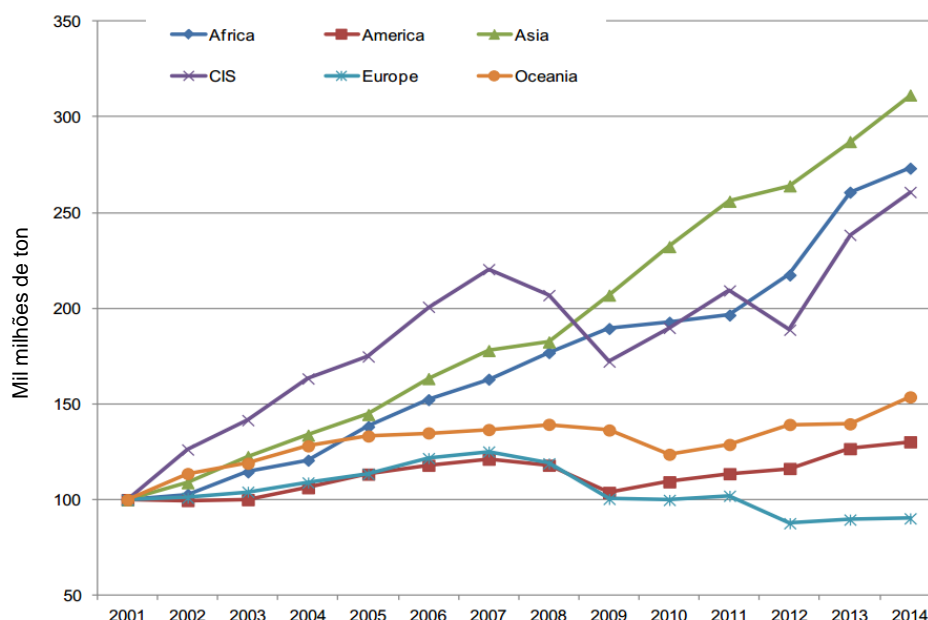
- Desenvolver uma avaliação sistemática das consequências ambientais associadas a um dado produto;
- Analisar os balanços ambientais relativos a um ou mais produtos ou processos, incentivando os decisores a aceitar um plano de ação;
- Quantificar as emissões/descargas para o ar, água e solo relativas a todas as fases do ciclo de vida e a outros processos relevantes;
- Auxiliar na identificação de trocas significativas de impactes entre etapas do ciclo de vida e o meio ambiental;
- Avaliar os efeitos ecológicos e na saúde humana do consumo de materiais e emissões, a uma escala local, regional e global;
- Comparar os impactes ecológicos e humanos de produtos alternativos ou identifica-los para um produto específico;
- Identificar os impactes ambientais relacionados com uma ou mais áreas ambientais específicas.

O carácter holístico e abrangente da ACV, que a distingue das outras ferramentas de gestão ambiental, é uma das principais causas das suas limitações, a par com a metodologia de ACV. A normalização global da metodologia de ACV confronta-se com a complexidade e as particularidades das várias áreas de aplicação da ferramenta (Rønning & Brekken, 2014), o que dificulta a sua aplicação plena. Inúmeros aspetos metodológicos têm que ser desenvolvidos e definidos de raiz. Métodos de recolha de dados, verificação da sua qualidade, de conversão e de cálculo são algumas das decisões relativas à metodologia de ACV que o utilizador deve tomar e que dificultam o desenvolvimento do estudo. Em menor escala, a análise de um conjunto vasto de processos e estágios traduz-se no processamento de uma grande quantidade de informação, de diferentes fontes e com contextos espaciais e temporais diferentes, e num processo de execução extremamente complexo, demorado e dispendioso (Ferreira, 2004; Rønning & Brekken, 2014)

## 2.2 Cimento

### 2.2.1 Indústria cimenteira

O cimento é um dos materiais mais utilizados no mundo, sendo essencial para o desenvolvimento de qualquer país, e um reflexo do seu estado económico e social (Uwasu *et al.*, 2014). No ano de 2014 foram produzidos 4,18 mil milhões de toneladas (ton) de cimento em todo o mundo (U.S. Geological Survey, 2015). Tem-se verificado um crescimento gradual da produção de cimento, apesar da discrepância entre os níveis de produção do Ocidente e do Oriente (Figura 2.8).

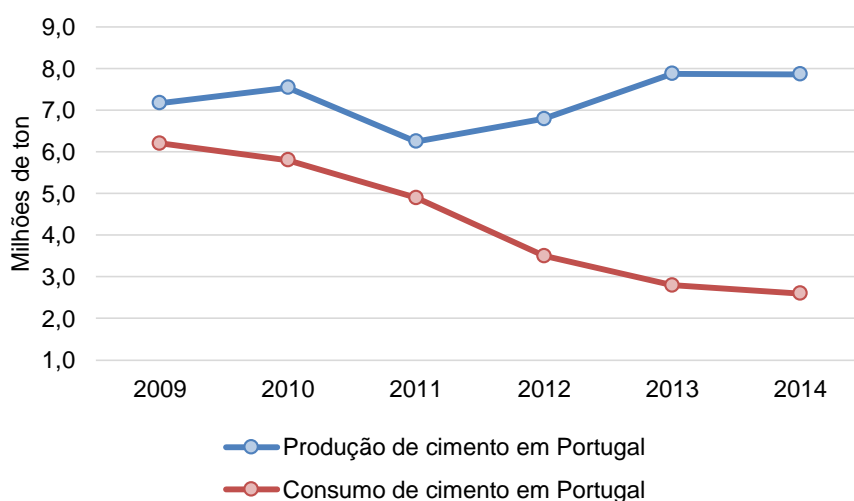


**Figura 2.8** – Variação da produção de cimento nos cinco continentes e na Federação Russa, entre 2001-2014 (fonte: Cembureau, 2014)

Na Europa verifica-se uma diminuição gradual da produção de cimento, desde que, em 2012, a crise económica se instalou em quase todo o território. A falta de capital impede o investimento em infraestruturas, e consequentemente, a procura do cimento decresce. Contudo, a melhoria da conjuntura económica europeia, permitiu que o setor da construção recuperasse, e que a produção de cimento crescesse ligeiramente (Cembureau, 2014). Segundo a Cembureau (2014), foram produzidas 235,5 milhões de ton de cimento. A Alemanha é responsável por 20,1% da produção da Europa (Cembureau, 2014), tornando-a no seu principal produtor. Em 2013, apresentou um aumento nos níveis de produção, em resultado da construção de edifícios residenciais, após uma diminuição pouco significativa decorrente de condições meteorológicas adversas (Cembureau, 2013a; Cembureau, 2012). A Ásia destaca-se com um aumento contínuo da produção de cimento desde 2008, em consequência da industrialização e do crescimento populacional. A China é o principal produtor de cimento, responsável por 56,5% da produção global (Cembureau, 2014). Esta posição resulta de

grandes investimentos na urbanização e modernização do território, acompanhados pelo crescimento do setor secundário. Ao contrário da maioria dos países do Ocidente, a China tem beneficiado das reformas económicas implementadas; contudo, o crescimento económico não é controlado. O receio de abrandar o ritmo de crescimento e da perda de lucro, não promove a aplicação de políticas de controlo da produção industrial, setor do qual resulta 42,6% do produto interno bruto (PIB) chinês (The World Bank, 2015). Deste problema faz parte a legislação ambiental cujas taxas de poluição e outros custos associados, inviabilizam o seu cumprimento. Canfa (2007) indica como os principais problemas de implementação e execução de legislação ambiental na China: a aplicação apenas superficial de mecanismos ambientais; a investigação ambígua e a punição tardia de crimes ambientais; a não indemnização das vítimas da poluição; a aplicação de penas administrativas em vez de penas criminais; e a falta de autoridade nas organizações e setores de proteção ambiental relevantes.

Em Portugal, a indústria cimenteira é representada por dois grupos empresariais: a Cimpor e a Secil. Ambos os grupos sofreram com a situação económica do país e a ausência de investimento interno desde 2010, principais causas da quebra de quase 20% na atividade do setor da construção (Cimpor, 2014). Consequentemente, a procura de materiais de construção diminuiu. A variação da produção e do consumo de cimento em Portugal, entre 2009-2014, é apresentada na Figura 2.9.



**Figura 2.9** – Evolução da produção e do consumo de cimento em Portugal, entre 2009 e 2014 (fonte: adaptado de Cimpor 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 e Secil 2010, 2011a, 2012, 2013a, 2014)

Verifica-se uma dissociação evidente entre a produção e o consumo de cimento nacionais. A partir de 2011 observa-se um aumento significativo dos níveis de produção de cimento em Portugal, enquanto o consumo mantém a sua tendência decrescente. Esta desagregação pode ser explicada por uma aposta no mercado externo em consequência da escassa procura interna, dado que tanto a Cimpor como a Secil possuem volumes de negócio em outros países, dentro e fora do Espaço Económico Europeu (EEE) (Cimpor, 2014; Secil, 2014a).

A indústria cimenteira corresponde a um dos setores da construção com maior intensidade de consumo de recursos naturais, contudo é uma das indústrias menos reguladas, existindo uma lacuna alarmante de legislação comunitária e global sobre o seu funcionamento (Uwasu *et al.*, 2014). A sobreposição entre o contexto económico difícil que a maioria dos países atravessa, e os elevados custos de produção deste setor, não estimulam o poder governamental a estabelecer leis e políticas rigorosas; apesar das circunstâncias, o setor do cimento possui um potencial lucrativo imenso. Esta problemática é especialmente evidente nos países em desenvolvimento (Figura 2.8), nos quais se verificam os níveis de produção e exportação de cimento mais elevados, a par do intenso crescimento populacional e da crescente necessidade de infraestruturas. A ausência de regulamentação ambiental, a mão-de-obra barata e os custos de produção muito reduzidos, promovem o investimento de países desenvolvidos na transferência dos processos produtivos para os países em desenvolvimento. Para contrariar essa tendência é necessário criar incentivos à reestruturação da indústria cimenteira de acordo com critérios de sustentabilidade, sem implicações significativas no ou em detrimento do lucro associado. Paralelamente, deverá ser criada legislação aplicável nos países em desenvolvimento; esta deverá ser de carácter internacional pois, devido aos problemas de corrupção latentes nas sociedades em desenvolvimento, o cumprimento das leis e a aplicação de penas e coimas, estão suscetíveis à influência da política interna (BCG, 2013). Contudo, estas medidas e ações só serão possíveis com a participação de um número significativo de países, dispostos a gerir a produção de cimento tendo em vista mais do que o retorno financeiro.

Para estimular a entrada da indústria cimenteira na nova era do desenvolvimento sustentável, foram criadas iniciativas e programas que procuram minimizar as pressões ambientais do setor sem prejudicar o potencial lucrativo do mesmo. A *Cement Sustainability Initiative (CSI)*, criada pelo *World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)*, tem como objetivo encontrar o papel da indústria do cimento no desenvolvimento sustentável e definir medidas que permitam a adaptação das empresas a uma nova realidade de crescimento (CSI, 2002). Esta organização atua em diferentes dimensões da proteção do ambiente, como as alterações climáticas, o consumo de combustíveis e matérias-primas, a redução de emissões e a integração do conceito de sustentabilidade nos processos administrativos e de gestão. A CSI desenvolveu um programa de medidas com vista à sustentabilidade do setor e à proteção e conservação das condições climáticas do planeta. Segundo o WBCSD-CSI (2012), este programa envolve: monitorizar e verificar os níveis de emissões; relatar e analisar os dados; promover práticas para redução da intensidade de carbono nas operações e nos produtos; participar no desenvolvimento de políticas e legislação comunitárias e globais; criar parcerias com as indústrias cimenteiras dos países em desenvolvimento. Segundo a IEA (2009), as principais ações desta iniciativa enquadram-se no âmbito da eficiência energética, da substituição de combustíveis fósseis e do clínquer por recursos alternativos e da captura e armazenamento de carbono.

A nível comunitário, a CE desenvolveu o *Roadmap 2050* que tem como principal objetivo a transformação da sociedade atual num sistema limpo, eficiente e sustentável, com emissões atmosféricas e consumo de combustíveis fósseis mínimos, substituídos por uma produção energética

essencialmente baseada em fontes renováveis (EC, 2015c). No setor industrial, as emissões deverão ser reduzidas entre 83-87% até 2050, através do investimento em processos produtivos mais eficientes, tanto a nível energético como da utilização de recursos (CE, 2011a). A curto-médio prazo, a CE implementou o Pacote Energia-Clima 2020 que visa um crescimento inteligente, sustentável e inclusivo, com medidas no âmbito da redução de emissões, do aumento do peso das energias renováveis e da eficiência energética e dos recursos (CE, 2014). Uma das medidas deste programa é o Regime Comunitário de Licenças de Emissão (RCLE), que abrange a indústria cimenteira no âmbito do controlo e mitigação das emissões de GEE. No período de cinco anos, alcançou uma redução de emissões de 13%, com efeitos insignificantes no PIB europeu (Brown *et al.*, 2008). Para além das emissões atmosféricas, a elevada intensidade de recursos naturais no setor do cimento implica o seu envolvimento na maximização da produtividade dos recursos, um dos principais objetivos do Pacote 2020. Esta problemática foi aprofundada no Roteiro para uma Europa Eficiente na Utilização dos Recursos que defende o investimento na produtividade dos recursos, justificado pela necessidade de abrandar o ritmo de exploração dos mesmos (CE, 2011b). A curto e médio prazo pretende-se alcançar o equilíbrio entre os níveis de produção e os de consumo de recursos naturais, de modo a permitir ao ambiente regenerar-se; a longo prazo, a dissociação entre o consumo de recursos e o crescimento económico (CE, 2011b). Para que a reestruturação seja possível, a dinâmica dos setores produtivos deve refletir essa realidade, o que exige “[...] alterar o método de produção de “extrair-fabricar-consumir-despejar” para um modelo de economia circular” (Cembureau, 2015).

O modelo de economia circular tem como finalidade a transição de um crescimento acelerado dependente de uma sobre-exploração dos recursos naturais, para um crescimento sustentável e duradouro. Surgiu da reflexão sobre a necessidade de transformar a relação economia-ambiente num fluxo circular (Figura 2.10) que permita a conservação e recuperação de recursos, em vez de um fluxo linear no qual o ambiente não é mais que um meio recetor (Su *et al.*, 2013).



**Figura 2.10** – Esquema representativo da economia circular num processo produtivo (fonte: adaptado de EC, 2014a)

Segundo a CE (2014), a económica circular baseia-se em dois princípios fundamentais: prolongar ao máximo o tempo de vida de um produto, de modo a reduzir a produção de resíduos; e manter o resíduo do produto no processo produtivo, reutilizando-o como um recurso. A implementação da economia circular no setor industrial exige um investimento na adaptação dos processos industriais e respetivas tecnologias, das cadeias de valor e dos próprios mercados e consumidores. Os processos produtivos devem ser otimizados e preparados para receber os resíduos, e complementados por técnicas inovadoras de tratamento e transformação de resíduos em recursos (CE, 2014). Todas as indústrias devem incorporar no seu processo de fabrico práticas de reciclagem, reutilização e recuperação (Cembureau, 2015). Os benefícios da dinâmica circular na indústria são tanto de carácter ambiental como económico (EC, 2015b); por um lado, a pressão sobre os recursos naturais e a intensidade de poluentes e resíduos produzidos decrescem, por outro, a diminuição dos custos de produção, dá às empresas uma maior margem financeira para o investimento e a expansão do seu negócio. Ao longo do tempo, o enraizamento dos princípios da economia circular nos mercados, irá refletir-se não só a nível da produção física do bem material, mas também a nível da criação e *design* do produto, de modo a que este vá de encontro às novas exigências do mercado.

A indústria cimenteira possui uma predisposição natural para adaptar o seu modo de produção ao formato da economia circular. O facto da sua linha de produção incluir processos de moagem e fragmentação de material, bem como fases em que este está exposto a condições de temperatura extremas, proporciona a oportunidade de substituir os recursos originais por recursos derivados de resíduos (CSI, 2014). Para a produção de clínquer e de cimento, a MPN, é substituída por MPS; na fase de cozedura do cru, os combustíveis fósseis que alimentam o forno de cimento são substituídos por combustíveis alternativos. As MPS correspondem a produtos secundários ou resíduos de outras indústrias, cuja composição possibilita a sua utilização como matéria-prima (EC, 2015d); os combustíveis alternativos correspondem a resíduos, coprodutos e biomassa com poderes caloríficos elevados (Usón *et al.*, 2013). A esta dinâmica de recuperação energética e reciclagem de recursos com base no reaproveitamento de resíduos dá-se o nome de “coprocessamento” (Cembureau, 2015). Esta funcionalidade da indústria cimenteira tem um efeito mitigador sobre o seu impacte ambiental, constituindo uma situação *win-win* para as entidades intervenientes. Ao mesmo tempo que auxilia outras indústrias a dar um fim aos seus resíduos, reduz os seus custos de produção dado que as matérias-primas e combustíveis alternativos são de menor custo que os convencionais (Usón *et al.*, 2013); contribui para a redução das emissões de CO<sub>2</sub>, e evita a deposição de resíduos em aterros, e potenciais problemas de contaminação. Contudo, as indústrias cimenteiras podem “[...] utilizar resíduos materiais apenas se for feito de forma segura, sem comprometer a integridade dos trabalhadores, das populações vizinhas, do ambiente ou do processo de produção, e se a qualidade do produto for conservada” (CSI, 2014).

### 2.2.2 Caracterização

Define-se por cimento “um ligante hidráulico, i.e. um material inorgânico, que quando misturado com água, forma uma pasta que solidifica e endurece por meio de reações e processos de hidratação, mantendo a sua força e estabilidade quando submersos” (CEN, 2004). Ocupa uma posição central no setor da construção sendo o principal componente do betão e da argamassa que resultam da adição de agregado a uma mistura de cimento e água. Estes materiais são os mais requisitados para a construção de infraestruturas, sendo o betão o segundo recurso mais utilizado pelo ser humano (Feiz *et al.*, 2015; Potgieter, 2012).

O cimento mais comum é o cimento *Portland*, cujas MPN envolvidas, são transversais aos diferentes tipos de cimento. As MPN que estão na base do cimento Portland são o calcário, a argila, a areia, o ferro e o gesso, ainda que o último apenas seja adicionado numa fase final do processo de fabrico. O calcário é rico em carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e corresponde à maior parte da mistura crua do cimento. A rocha de calcário, o giz e a marga – tipo de calcário rico em compostos argilosos – são utilizados como fontes de  $\text{CaCO}_3$ . Da argila, da areia, do ferro e do gesso resultam, respetivamente, a alumina, a sílica, o óxido de ferro e o sulfato de cálcio (Huntzinger & Eatmon, 2008). As MPN indicadas anteriormente podem ser substituídas por MPS, como cinzas volantes e escórias metálicas (Greer *et al.*, 2000). A mistura calibrada de matérias-primas, naturais e secundárias, após o devido processamento, passa a designar-se cru. A exposição do cru a temperaturas de fusão resulta na formação de uma massa seca designada por clínquer. Os pesos de cada componente do clínquer são apresentados na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2** – Composição do clínquer Portland (fonte: adaptado de van Oss, 2011)

Composição do clínquer (em %)			
MPN	Calcário	Óxido de cálcio	65
		Outros compostos (como óxidos de magnésio)	4
	Areia	Sílica	22
	Argila	Óxido de alumínio	6
	Ferro	Óxido de ferro	3

O clínquer é constituído por cinco elementos fundamentais: cálcio, silício, alumínio, ferro e oxigénio. O carbono faria parte desse conjunto mas é removido na descarbonização do  $\text{CaCO}_3$  (Greer *et al.*, 2000). Desse mesmo processo, resultam o óxido de cálcio e outros compostos decorrentes das impurezas presentes no calcário, como o magnésio, sódio e potássio (British Geological Survey, 2014). Os compostos de sílica, alumínio e ferro são produtos da decomposição térmica da areia, da argila e do ferro, respetivamente.

A composição química do produto final corresponde essencialmente a uma mistura de quatro minerais, produtos da fusão dos compostos indicados anteriormente: alite, belite, celite e ferrite (Tabela 2.3).

**Tabela 2.3** – Composição química do cimento (fonte: Imbabi *et al.*, 2012)

Composição química base (em %)	
<i>Alite</i> (silicato tricálcico)	53,0
<i>Belite</i> (silicato dicálcico)	26,0
<i>Celite</i> (aluminato tricálcico)	10,5
<i>Ferrite</i> (aluminoferrite tetracálcico)	10,5

Após o processo de calcinação estar completo, é adicionado gesso ou outra fonte de sulfato de cálcio (Feiz *et al.*, 2015) e/ou suplementos minerais. Consoante a aplicação final do cimento e o local onde este será utilizado, são adicionados suplementos minerais, responsáveis por amplificar diferentes propriedades do produto final (Müller, 2012); a estes cimentos atribui-se a designação de cimentos compósitos. Entre as cinco categorias de cimento, é a quantidade de clínquer e a tipologia dos suplementos minerais que determinam a sua classificação (Tabela 2.4).

**Tabela 2.4** – Classificação dos tipos cimento de acordo com a NE 197-1:2000 (fonte: CEN, 2004)

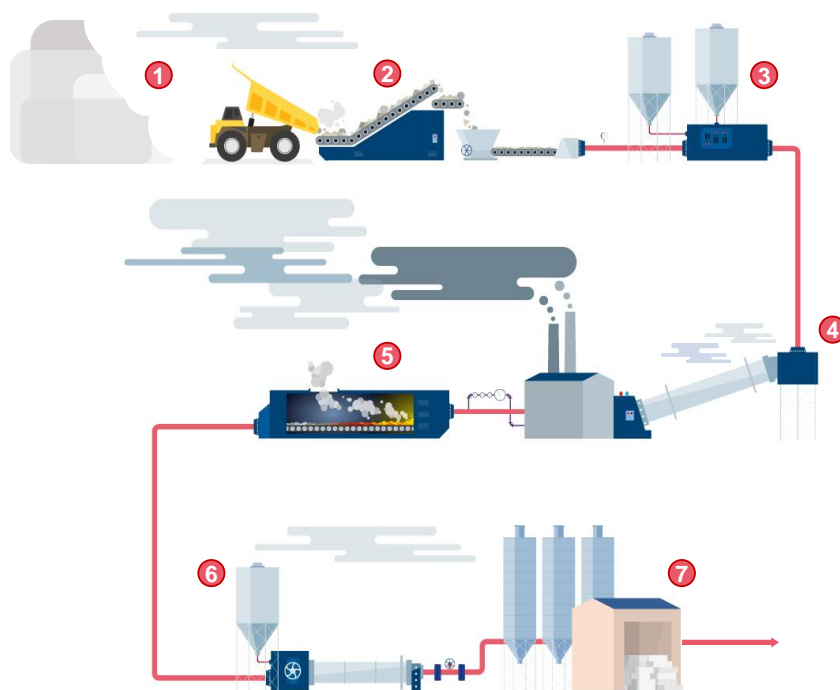
Designação	Composição (em %)		
	<i>Clínquer</i>	<i>Suplementos minerais</i>	<i>Gesso</i>
<i>CEM I</i> – Cimento <i>Portland</i>	95-100	-	0-5
<i>CEM II</i> – Cimento <i>Portland</i> compósito	65-94	6-35	0-5
<i>CEM III</i> – Cimento com escórias de ferro	5-64	35-95	0-5
<i>CEM IV</i> – Cimento pozzolânico	45-89	11-55	0-5
<i>CEM V</i> – Cimento compósito	20-64	50-80	0-5

O *CEM I* é o mais comum, bem como o que apresenta maiores níveis de produção em todo o mundo. Comparativamente às restantes categorias é o que apresenta a percentagem de clínquer mais elevada. Os cimentos do tipo II, III, IV e V correspondem a cimentos compósitos, com um teor em clínquer mais baixo, compensado pela adição de suplementos minerais (British Geological Survey, 2014). Desta forma, promovem uma menor necessidade de MPN e menores custos de produção (Müller, 2012). Comparativamente ao *CEM I* apresentam uma resistência e força idênticas a médio e longo prazo e, aquando da produção de betão, a massa apresenta uma maior fluidez, mas uma menor temperatura de hidratação, com exceção do *CEM III* (Kim, 2010). O *CEM II* engloba cimentos com cinzas volantes, escória granulada ou calcário triturado; o *CEM III* apresenta um teor elevado em escória granulada; os cimentos da categoria IV contêm aditivos pozzolânicos; no *CEM V* o clínquer é substituído por pozzolanas e escória granulada ou cinzas volantes (Imbabi *et al.*, 2012).



### 2.2.3 Processo de fabrico

A produção de cimento é um processo complexo que envolve a coordenação de diferentes áreas com a finalidade de garantir a qualidade do produto final. A Figura 2.11 representa um processo de fabrico de cimento comum.



**Figura 2.11** – Esquema de um processo de produção de cimento (fonte: adaptado de Amato, 2013)

#### a. Extração da MPN e britagem (1 e 2)

A extração de MPN é feita através da exploração a céu aberto de uma ou mais pedreiras, geralmente localizadas na envolvente da fábrica de modo a minimizar os custos de transporte (van Oss & Padovani, 2002). A partir da exploração das pedreiras obtêm-se calcário, giz e/ou marga, fontes de carbonato de cálcio. De seguida, a MPN é enviada para o britador, onde a sua granulometria é reduzida. Depois de preparada, a MPN é transportada para as instalações da fábrica, através de correias transportadoras (Caruso, 2006; Mishra & Siddiqui, 2014). Na fábrica, o armazenamento da matéria-prima deve ter em conta as condições climáticas e a quantidade do material em fração fina, de modo a reduzir a perda de recursos, quantitativa e qualitativamente. Em substituição da MPN, podem ser utilizadas MPS; estes recursos alternativos chegam à fábrica devidamente tratados pelo que não exigem uma preparação especial, sendo apenas armazenados em silos separados das MPN.

b. Moagem de cru (3)

Depois de armazenadas, as matérias-primas são sujeitas a um processamento final, através do qual se obtém o cru. Esta massa, que resulta da moagem e homogeneização da matéria-prima, já apresenta uma composição mineralógica específica, de acordo com o tipo de cimento que se pretende produzir (Greer *et al.*, 2000). A moagem do cru deve ser supervisionada e bem calibrada, pois uma falha nesta etapa pode prejudicar a qualidade do produto, principalmente, se a moagem for em excesso.

Esta etapa do processo de produção de cimento pode ocorrer por via húmida ou por via seca (Greer *et al.*, 2000), sendo que a escolha depende do teor de humidade da MPN e também dos custos de produção definidos. A produção de cimento por via húmida é a opção indicada quando a humidade da matéria-prima é superior a 20%, contudo exige um maior consumo de energia pois a água deve evaporar-se antes do processo de calcinação começar (IEA, 2010). Neste tipo de produção, durante a moagem, é adicionada água ao cru, formando-se uma lama fluída (Greer *et al.*, 2000). Por via seca, o cru passa por um processo de secagem que reduz o teor em humidade da matéria-prima para valores inferiores a 1% (Greer *et al.*, 2000). A secagem pode ocorrer antes ou durante a moagem, com recurso a ar quente proveniente do forno ou do sistema de pré-aquecimento.

O processo de moagem pode ser concretizado por dois tipos de moinho: moinho de mós ou moinho com corpos moentes (Greer *et al.*, 2000). O primeiro corresponde a um moinho vertical constituído por mós estáticas e uma mesa rotativa onde está exposto o material; à medida que a mesa vai rodando, o cru é esmagado e transportado por uma corrente de ar ascendente, em direção a um conjunto de peneiras que remove as partículas de granulometria grosseira, reencaminhadas para o moinho. O moinho com corpos moentes é uma estrutura tubular horizontal com granalha de aço no seu interior que ao colidir com o cru reduz o seu tamanho (Greer *et al.*, 2000). Tal como no moinho de mós, de modo a promover a homogeneidade da mistura, as partículas de dimensões grosseiras são removidas e reencaminhadas para o moinho. Após a conclusão deste processo, por via húmida, a lama é agitada, homogeneizada e armazenada em tanques, enquanto por via seca, o cru é enviado para silos de armazenagem onde é homogeneizado (Greer *et al.*, 2000).

c. Cozedura do cru (4)

Na produção de cimento, a cozedura do cru é o processo mais importante; envolve o fabrico do produto intermédio do cimento, pelo que qualquer falha nesta fase refletir-se-á negativamente na qualidade do produto final. Quer a linha de produção de cimento siga a via húmida ou a via seca, a cozedura ocorre em fornos rotativos.

O forno rotativo é uma estrutura cilíndrica com cerca de 6 m de diâmetro e comprimento variável entre os 50-200 m (van Oss & Padovani, 2002). Tendo em conta as condições de produção (via húmida ou via seca), o forno apresenta diferentes tipologias: forno rotativo húmido; forno rotativo semi-húmido;

forno rotativo semi seco; forno rotativo seco (comprido); forno rotativo com pré-aquecedor; e forno rotativo com pré aquecedor e pré calcinador (Madloul *et al.*, 2011).

Na categoria dos fornos rotativos para produção por via húmida, a diferença diz respeito à passagem da lama homogeneizada por um filtro para redução da humidade, no caso do forno semi-húmido (Madloul *et al.*, 2011). Ambos possuem uma zona de secagem do cru, de pré-aquecimento, de calcinação, de sinterização e de arrefecimento (van Oss & Padovani, 2002). O comprimento destes fornos é de cerca de 200 m, devido à necessidade do material ter um tempo de retenção mais longo (mínimo de 2 horas) para a evaporação da água presente no cru (van Oss & Padovani, 2002).

No grupo dos fornos rotativos para produção por via seca, a diferença entre os fornos corresponde à existência ou não de sistemas complementares que promovam a eficiência energética do forno, isto é, o pré-aquecedor e o pré-calcinador (Usón *et al.*, 2013). O forno seco comprido, o único desta categoria que não possui um sistema de pré-aquecimento, apresenta um comprimento de 130 m e as mesmas zonas dos fornos húmidos, excetuando a zona de secagem (van Oss & Padovani, 2002). Com a instalação do pré-aquecedor e do pré-calcinador, o comprimento do forno diminui significativamente para valores entre os 50-90 m. Com estes sistemas complementares, a calcinação tem início no pré-calcinador e termina no forno, pelo que o tempo de retenção não ultrapassa os 20 minutos (van Oss & Padovani, 2002). De modo a evitar a acumulação de cloro, sulfatos e álcalis no local de entrada do cru no forno, são instalados sistemas *bypass* para a remoção de uma parte dos gases de combustão produzidos (EC, 2013).

O forno é alimentado por combustíveis fósseis e/ou alternativos. Os combustíveis fósseis variam entre o carvão, o coque de petróleo, o fuelóleo, o gás natural e o gasóleo (Madloul *et al.*, 2011), sendo os dois primeiros os mais comuns na indústria cimenteira, dado ao seu baixo custo. Quanto aos combustíveis alternativos, estes incluem resíduos de biomassa, como farinhas animais e resíduos vegetais, combustíveis derivados de resíduos (CDR), resíduos químicos e resíduos perigosos (Benhelal *et al.*, 2012).

A preparação do combustível é semelhante entre os convencionais e os alternativos. Os últimos requerem cuidados adicionais ao nível do armazenamento e introdução no forno, de modo a evitar fugas e derrames passíveis de criar problemas ambientais ou de saúde pública (EC, 2013). No caso de combustíveis sólidos, estes são introduzidos no forno de forma direta ou indireta: de forma direta, o combustível é enviado para os moinhos de carvão, onde é seco e moído, antes de ser introduzido no forno; a alimentação indireta envolve o armazenamento temporário do combustível processado, e a sua calibração antes de entrar no forno (Greer *et al.*, 2000). A secagem e o transporte do combustível moído para o ponto de saída ocorrem com recurso a ar quente desviado do sistema de arrefecimento, no caso da alimentação direta, e do forno no caso da alimentação indireta (Greer *et al.*, 2000). Os combustíveis alternativos, dado que correspondem na sua maioria a efluentes contaminados e/ou perigosos, são sujeitos a processos de tratamento antes de serem recebidos pela fábrica, que por sua vez deverá garantir o manuseamento adequado do material (EC, 2013).

A cozedura do cru consiste num conjunto de reações químicas que transformam as matérias-primas em minerais cimentícios. Envolve quatro etapas principais: pré-aquecimento, calcinação, sinterização e arrefecimento (EMEP/EEA, 2013).

A fase de pré-aquecimento apenas ocorre em linhas de produção por via seca. Para promover a eficiência energética do processo, entre o silo de armazenagem e o forno, o cru passa por uma torre de ciclones onde o material é aquecido por contato com contracorrentes ciclónicas de ar quente, proveniente do forno (Greer *et al.*, 2000). Ainda nesta etapa, ocorre a evaporação da água presente no cru e a decomposição dos compostos de sílica, alumínio e ferro. A cerca de 900 °C, tem início o processo de calcinação, i.e., a decomposição térmica do  $\text{CaCO}_3$  em óxido de cálcio, com libertação de  $\text{CO}_2$ . Em casos que esteja instalado um sistema de pré-aquecimento, a reação de calcinação é concretizada até 40%, antes do material dar entrada no forno (van Oss & Padovani, 2002). Com um sistema de pré-calcinação, a reação é praticamente completada antes do material entrar no forno, podendo ser alcançada uma taxa de 90% de calcinação (EC, 2013). A reação de calcinação é completada no forno de cimento, onde o material atinge temperaturas superiores a 1000 °C. Entre os 1400-1500 °C, ocorre a fase de sinterização na qual o óxido de cálcio funde-se com a sílica, o alumínio e o ferro, com consequente formação dos minerais cimentícios. A uma temperatura entre os 1450-1500 °C, o clínquer é enviado para o sistema de arrefecimento.

#### d. Arrefecimento do clínquer (5)

Segundo a EC (2013), existem três tipos de arrefecedores: tubo rotacional, arrefecedor de satélites e arrefecedor de grelhas. O arrefecedor tubular é instalado por baixo do forno de cimento, na zona de saída, juntamente com um sistema de elevadores que direcionam o clínquer para o arrefecedor. O clínquer é despejado para a corrente de ar à temperatura ambiente existente no arrefecedor, responsável pela dispersão e arrefecimento do material. O arrefecedor de satélites consiste num conjunto de nove a onze tubos rotacionais, agregados ao forno de cimento. O material incandescente entra diretamente nos tubos a partir do forno, pelos quais circula e arrefece por contato com correntes de ar e pela dispersão de água sobre a exterior dos tubos. O arrefecedor de grelhas funciona pela deposição do clínquer em grelhas pelas quais passa ar frio. A movimentação do clínquer dentro do sistema de arrefecimento ocorre através de uma grelha que se desloca desde o local de receção do clínquer até ao ponto de descarga, ou através de uma sucessão de grelhas pelas quais o material passa até ao local de descarga.

Através do processo de arrefecimento, a temperatura do clínquer desce para valores entre os 170-200 °C (Madloul *et al.*, 2011; Navia *et al.*, 2006). É uma etapa essencial pois promove o fim das reações químicas e a cristalização dos minerais cimentícios. Em resultado deste processo é gerado ar quente, em parte recirculado para o forno, como medida de eficiência energética (Mishra & Siddiqui, 2014).

A Tabela 2.5 resume o processo de clínquerização, indicando as temperaturas, e respectivas reações químicas, desenvolvidas ao longo desta etapa.

**Tabela 2.5** – Resumo do processo de cozedura do cru (fonte: adaptado de van Oss & Padovani, 2002; EMEP/EEA, 2013; Madlool *et al.*, 2011)

Fase	Sistema	Temperatura (°C)	Reação
<i>Pré-aquecimento</i>	Torre de ciclones	<200	Evaporação da água presente no cru
		200-750	Formação de dióxido de sílica e óxidos de alumínio e ferro
<i>Calcinação</i>		750-1 000	Início da calcinação – decomposição do carbonato de cálcio em óxido de cálcio com libertação de CO <sub>2</sub>
	Forno de cimento	1 200-1 450 (máx. 1 500)	Fim da calcinação
<i>Sinterização</i>			Formação dos minerais de cimento, por reação do óxido de cálcio com o dióxido de sílica e os óxidos de alumínio e ferro
<i>Arrefecimento</i>	Arrefecedor	1 450-170	Arrefecimento do clínquer e cristalização dos minerais cimentícios

e. Moagem do cimento, empacotamento e expedição (6 e 7)

A última etapa da produção de cimento envolve a moagem do clínquer juntamente com os aditivos minerais. É adicionado o gesso e outros suplementos minerais, caso o objetivo seja produzir um cimento compósito. A moagem é concretizada em moinhos de corpos moentes (descrito na fase de moagem do cru). O processo ocorre em circuito fechado de modo a que as partículas de cimento que ainda não possuam a dimensão necessária sejam reintroduzidas no moinho (Greer *et al.*, 2000). O cimento produzido é transportado do moinho de cimento para os silos de armazenagem via um sistema pneumático, complementado por correias transportadoras e elevadores de baldes (EC, 2013). Dos silos de armazenagem, o cimento passa para a estação de empacotamento.

Relativamente ao empacotamento do cimento, este é geralmente acondicionado em sacos de papel por máquinas de empacotamento automático (Greer *et al.*, 2000). O produto final é enviado da fábrica para os clientes por via rodoviária, ferroviária ou marítima (EC, 2013).

#### 2.2.4 Consumos e emissões

A produção de cimento é um processo que exige o consumo significativo de recursos naturais e energia, na sua maioria, de fontes não renováveis. Tem como base a extração de quantidades significativas de MPN cujo processamento envolve condições de elevada temperatura, conseguida por meio de um consumo igualmente expressivo de combustíveis fósseis. Atualmente, a indústria cimenteira já estabeleceu uma tradição de investimento em sistemas de recuperação de matéria-prima e energia e

na reciclagem de produtos secundários e resíduos. Destas medidas resultam menores custos de produção e a mitigação dos impactos ambientais da atividade.

a. Fluxos de entrada

Um dos principais fluxos na produção de cimento é o de matérias-primas. O consumo de MPN ocorre duas vezes ao longo da produção de cimento: nas fases de produção do clínquer e de produção do cimento. Parte da matéria-prima consumida na produção do clínquer pode ser substituída por MPS, tal como parte do clínquer, na produção do cimento. Na Tabela 2.6 é apresentada a correspondência entre as MPN e as MPS que as podem substituir.

**Tabela 2.6** – Correspondência entre MPN e MPS (fonte: adaptado de EC, 2013)

MPN	MPS
<i>Calcário ou marga</i>	Resíduos de calcário Lamas calcárias Lamas carbonatadas Lamas do tratamento de águas residuais
<i>Areia, argila e ferro</i>	Areias de fundição Lamas industriais Escórias de alto-forno Cinzas de pirite Hematite sintética Lamas vermelhas Cinzas volantes
<i>Calcário, marga e argila</i>	Escórias Rocha triturada Solo

A substituição de MPN por MPS segue um conjunto de critérios que visa salvaguardar a qualidade do produto final e impedir que a combustão desses materiais não tenha impactos ambientais mais graves. A composição química, a reatividade, a qualidade do produto final, a disponibilidade do material e os custos associados (obtenção, transporte, armazenamento, processamento), a legislação e o impacto ambiental, são os principais aspetos a ter em conta na seleção de resíduos industriais para substituir recursos naturais (van Oss & Padovani, 2003).

De acordo com a literatura (EMEP/EEA, 2013; Chen *et al.*, 2010; Feiz, *et al.*, 2015; EC, 2013), são necessárias, cerca de 1,57 ton de MPN/ton de clínquer. Dado à proporção média de 73,7% de clínquer por ton de cimento (Cembureau, 2013b), por ton de cimento são necessárias cerca de 1,15 ton de MPN. De acordo com a Cembureau (2013b), entre 3-4 % da MPN é substituída por MPS, o que corresponde a uma média de 0,05 ton de MPS/ton de clínquer, equivalente a 0,04 ton de MPS/ton de cimento.

A redução da intensidade de clínquer na composição do cimento é compensada pelo consumo de suplementos minerais, que em parte, são resíduos e coprodutos industriais. Os aditivos minerais incluem cinzas volantes, escórias de alto-forno, pozolanas, entre outros. O peso das MPS na composição final do cimento varia de acordo com o tipo de cimento (Tabela 2.4). No caso de um cimento *CEM II*, 1 ton de cimento pode possuir até cerca de 0,35 ton de MPS.

Ao contrário do consumo de MPN, verificado apenas em duas instâncias da produção de cimento, o consumo de energia ocorre ao longo de todo o processo. A energia consumida divide-se entre energia térmica e energia elétrica, sendo que a primeira pode atingir 90% do total de energia consumida (Afkhami *et al.*, 2015). O consumo de energia térmica diz respeito ao funcionamento do forno de cimento, sendo variável de acordo com o modelo do forno, e este por sua vez, de acordo com o tipo de produção (Tabela 2.7).

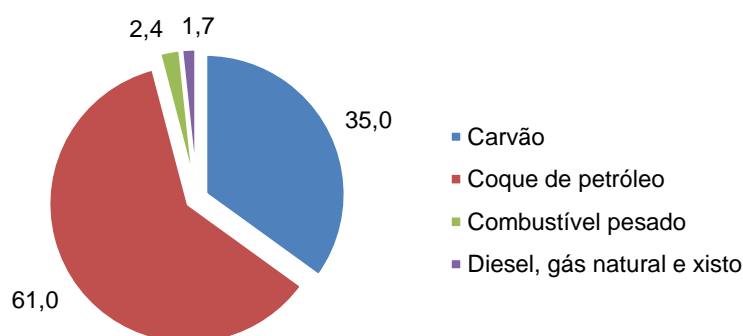
**Tabela 2.7** – Consumo de energia térmica por tipo de forno (fonte: adaptado de Usón *et al.*, 2013)

Tipo de Forno	Consumo de Energia Térmica	
	(MJ/ton de clínquer)	(MJ/ton de cimento)*
<i>Forno rotativo seco</i> (com pré-aquecedor e pré-calcinador)	3 000 – 4 000	2 211 – 2 948
<i>Forno rotativo seco</i> (com pré-aquecedor)	3 100 – 4 200	2 285 – 3 095
<i>Forno rotativo seco</i> (comprido)	> 5 000	> 3 685
<i>Forno rotativo semi-seco ou semi-húmido</i>	3 400 – 4 000	2 506 – 2 948
<i>Forno rotativo húmido</i>	5 000 – 7 500	3 685 – 5 528

\*Valores calculados com base na proporção de 73,7% de clínquer por ton de cimento

Comparativamente ao consumo teórico de cerca de 1 750 MJ/ton de clínquer (Usón *et al.*, 2013; Imbabi *et al.*, 2012), o consumo médio real de 3 730 MJ/ton de clínquer (Cembureau, 2013b), equivalente a 2 749 MJ/ton de cimento, é significativamente superior. Isto deve-se ao facto do cru não ser constituído pelos materiais convencionais na sua composição mineralógica e propriedades mais puras.

Na Figura 2.12 é representado o consumo de diferentes tipos de combustíveis fósseis na produção do cimento.



**Figura 2.12** – Consumo de combustíveis fósseis, por categoria (em %) (fonte: adaptado de Cembureau, 2013c)

O carvão é o combustível fóssil mais requisitado, a par com o coque de petróleo, que apresenta o custo mais baixo. Contudo, são estes combustíveis os que mais contribuem para as emissões de GEE (IEA, 2010).

De modo a reduzir custos de produção e mitigar as emissões de CO<sub>2</sub> por combustão dos combustíveis fósseis, a indústria cimenteira tem apostado na substituição dos recursos energéticos convencionais por combustíveis alternativos. Na Tabela 2.8 são apresentados diferentes tipos de combustíveis alternativos, com a indicação de alguns exemplos.

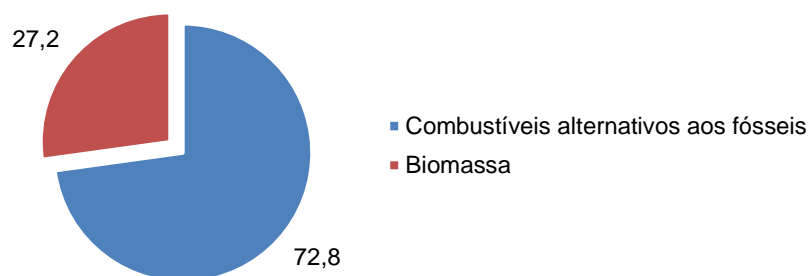
**Tabela 2.8** – Classificação dos combustíveis alternativos utilizados na produção de cimento (fonte: Madloul *et al.*, 2011)

Classe	Tipo de combustível	Exemplos
1	Gasosos	Resíduos gasosos de refinaria; gases de aterro sanitário
2	Líquidos	Solventes de cloro; óleos hidráulicos
3	Sólidos triturados finamente	Pó de serragem; lamas de esgoto secas; plástico granulado; farinhas animais; pneus triturados (fração fina)
4	Sólidos triturados grosseiramente	Pneus triturados (fração grosseira); resíduos de plástico e borracha; matéria orgânica aglomerada
5	Outros	Pneus inteiros; fardos de plástico

Os combustíveis alternativos indicados têm composições e propriedades específicas que deverão ser controladas de modo a não prejudicarem a qualidade do produto final. O facto de serem consumidas em mistura com os combustíveis convencionais, realça a necessidade de um controlo rigoroso, tendo em conta as alterações que poderão resultar dessa sinergia. O principal efeito da substituição de combustíveis fósseis por alternativos ocorre no processo de cozedura, em termos das zonas do forno, níveis de temperatura e condições de arrefecimento (Usón *et al.*, 2013). Segundo Madloul *et al.* (2011) devem ser tidos em conta aspetos como: o estado físico do combustível (sólido, líquido ou gasoso); a toxicidade (compostos orgânicos, metais pesados); a composição em cinzas e compostos voláteis; o poder calorífico (superior a 14 MJ/kg); as emissões resultantes da combustão; a influência sobre o produto final; e a viabilidade económica.

Segundo a Cembureau (2014), cerca de 37% do total de energia térmica consumida na produção de cimento, tem origem em combustíveis alternativos. Dentre os combustíveis desta categoria, os mais consumidos são os plásticos, CDR, pneus, farinhas e gorduras animais, solventes e resíduos de óleos, destacando-se os resíduos de pneus e os resíduos animais (EC, 2013). Os resíduos de pneus são o combustível alternativo mais procurado dado ao elevado poder calorífico (26 MJ/kg), e pelo facto de a partir dos pneus também serem retirados materiais substituintes de MPN (Cembureau, 2014). Dentre os combustíveis de biomassa, as gorduras e farinhas animais são os resíduos mais procurados devido ao poder calorífico médio de 23 MJ/kg. Contudo, os combustíveis de biomassa apresentam um consumo significativamente inferior aos restantes combustíveis alternativos (Figura 2.13).

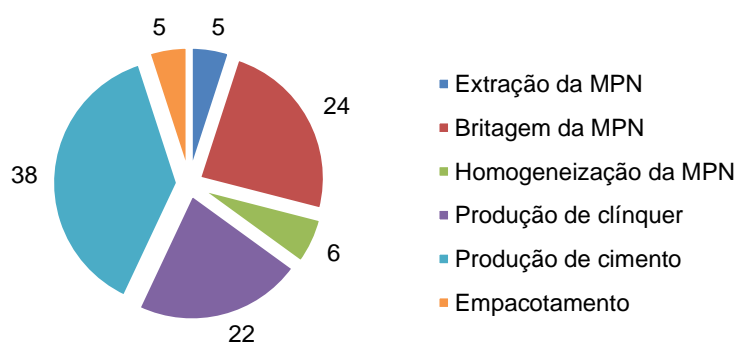




**Figura 2.13** – Consumo de combustíveis alternativos, por tipologia, (em %) (fonte: adaptado de Cembureau, 2013a)

O facto dos combustíveis alternativos aos fósseis possuírem um poder calorífico superior ao dos combustíveis de biomassa é um dos fatores que contribui para a discrepância de consumos (Cembureau, 1999). Por outro lado, a maior abundância e disponibilidade dos primeiros, contribuem para que a biomassa, nem sempre disponível em quantidades suficientes para satisfazer as necessidades energéticas do processo de produção do cimento, não tenha maior adesão. Contudo, em termos de emissões de CO<sub>2</sub>, dado a sua origem natural, os resíduos de biomassa são considerados neutros ou *carbon-neutral* (van Oss, 2011).

Ao contrário do consumo de energia térmica, associado apenas à fase de produção do clínquer, a energia elétrica ocorre em várias fases do processo. A média europeia é de 114 kWh/ton de cimento (Cembureau, 2013b), que se encontra enquadrada entre os 90-150 kWh/ton de cimento definidos pela EC (2013). Na Figura 2.14 é apresentada a percentagem do consumo total de energia elétrica respeitante a cada fase da produção de cimento.



**Figura 2.14** – Consumo de energia elétrica (em %) no processo de produção do cimento (fonte: Cembureau, 2013a)

Verifica-se que as fases de britagem, produção do clínquer e produção do cimento compreendem os consumos mais elevados. Respetivamente, abrangem o funcionamento do britador, do moinho de cru e do forno de clínquer e do moinho de cimento (Cembureau, 2013a). Em conjunto são responsáveis pelo consumo de mais de 80% de toda a energia elétrica.

Comparativamente a outras indústrias, a intensidade de recursos hídricos na indústria do cimento não é significativa. Para além disso, na maioria das fábricas a água consumida não é potável, sendo distribuída imediatamente após a extração subterrânea (EC, 2013). O seu consumo varia de fábrica para fábrica, e está geralmente associada à pelotização do cru, à refrigeração do forno e dos moinhos, e à produção da lama de cru, no caso da produção por via húmida. Segundo Chen *et al.* (2010), pode ocorrer um consumo de 0,2 ton de água/ton de cimento. Na produção por via húmida, o consumo é mais expressivo, com um gasto de aproximadamente 0,8 ton de água/ton de clínquer na etapa de moagem do cru (van Oss & Padovani, 2003).

#### b. Fluxos intermédios

Da utilização das matérias-primas e do combustível que dão entrada na linha de fabrico, resultam produtos intermédios e emissões que são mantidas dentro dos limites do sistema, através da sua recirculação. Os produtos intermédios incluem o cru e o clínquer, enquanto as emissões dizem respeito ao pó do forno de cimento (PFC), os gases de escape do forno e o ar introduzido no sistema de arrefecimento.

O PFC é libertado em conjunto com gases de combustão, e é composto por partículas finas de cru e clínquer, e material erodido do revestimento interior do forno. Contudo, através da instalação de exaustores eletrostáticos, cerca de 66% do PFC emitido é recuperado e reintroduzido no forno (van Oss & Padovani, 2003). Esta medida promove a poupança de matéria-prima e energia, dado que a composição do PFC é idêntica à do cru. A produção de 1 ton de clínquer resulta na emissão média de 0,2 ton de PFC (Huntzinger & Eatmon, 2008).

Os gases de escape, devido à sua temperatura, são recirculados para o sistema de pré-aquecimento e utilizados como fonte de calor, contribuindo para um menor consumo de recursos energéticos. O ar utilizado para arrefecer o clínquer, também devido à sua temperatura, pode ser reintroduzido no sistema de pré-aquecimento, com o mesmo objetivo dos gases de escape.

#### c. Fluxos de saída

Em resultado dos diferentes fluxos de entrada, e dos fluxos internos, surgem os *outputs* da produção de cimento. Os fluxos de saída apresentam tipologias e estados físicos distintos. Incluem o produto final, os coprodutos, as emissões atmosféricas de gases e partículas, águas residuais e os resíduos gerados.

As emissões atmosféricas verificam-se em todo o processo de fabrico, desde o funcionamento do forno, dos moinhos e dos sistemas de pré-aquecimento e arrefecimento, até ao próprio processamento, transporte e armazenamento dos produtos intermédio e final. O tipo de forno, as condições de

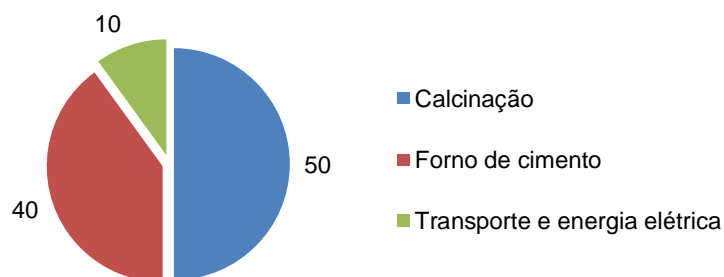
combustão, as características do cru e da mistura de combustíveis e o tipo de mecanismos de controlo de emissões, são fatores que condicionam as emissões atmosféricas resultantes da produção de cimento. Dos gases emitidos o CO<sub>2</sub> é aquele a que é atribuída uma maior importância dada a sua relação estreita com o efeito de estufa, o aquecimento global e as alterações climáticas. Segundo Josa *et al.* (2007), a emissão de CO<sub>2</sub> varia de acordo com o tipo de cimento, com valores entre as 0,4-0,9 ton/ton de cimento (Tabela 2.9).

**Tabela 2.9** – Emissão média de CO<sub>2</sub> por tipo de cimento (fonte: adaptado de ECRA 2015a, 2015b, 2015c e IBU, 2012)

Classe de cimento	Emissão média de CO <sub>2</sub> (kg/ton de cimento)
CEM I	900
CEM II	740
CEM III	480
CEM IV	580

Verifica-se que a emissão média acompanha a intensidade de clínquer na composição do cimento. O CEM I, composto essencialmente de clínquer, apresenta o valor mais elevado. A produção de CEM I pode atingir níveis de emissão superiores a 900 kg de CO<sub>2</sub>/ ton de cimento (Benhelal *et al.*, 2012; van Oss, 2011). O CEM III apresenta o valor mais baixo, dado que a sua composição em clínquer pode ser de apenas 5%.

Na Figura 2.15 são apresentadas as origens do CO<sub>2</sub> na produção de cimento e respetivas intensidades de emissão em percentagem.



**Figura 2.15** – Emissão de CO<sub>2</sub>, em %, por etapa da produção de cimento (fonte: WBCSD-CSI, 2015)

Cerca de 50% do CO<sub>2</sub> resulta do processo de descarbonização do calcário, e o restante da queima dos combustíveis fósseis e alternativos (Feiz *et al.*, 2015; IEA, 2010; Huntzinger & Eatmon, 2008). Devido ao elevado teor em carbono do calcário, a calcinação deste material resulta na emissão de cerca de 0,52 ton de CO<sub>2</sub>/ton de clínquer (Usón *et al.*, 2013; Feiz *et al.*, 2015). O restante processo de cozedura do cru continua a contribuir para a emissão deste GEE, ainda que esta varie de acordo com a eficiência energética do forno, mecanismos de recuperação de calor, a composição da mistura de combustível utilizada e o tipo de cimento a ser fabricado (Mishra & Siddiqui, 2014). O restante resulta do transporte das matérias-primas e dos combustíveis para a fábrica e do consumo de eletricidade, principalmente

nos processos de moagem. A intensidade das emissões varia de acordo com o tipo de transporte, sendo o rodoviário o que apresenta maiores níveis de produção de CO<sub>2</sub>.

Para além do CO<sub>2</sub>, as partículas (PM<sub>2,5</sub> e PM<sub>10</sub>) são as emissões mais significativas da indústria cimenteira. Ocorrem em diferentes fases do processo fabril, desde a extração da MPN, a sua britagem e moagem, até à cozedura do cru e empacotamento do produto final. Segundo Mishra & Siddiqui (2014), identificam-se cinco tipos de partículas:

- **Matéria-prima particulada** – Produzida na fases iniciais do processo correspondentes à aquisição e processamento das MPN;
- **Pó de cru** – Emitido aquando do seu transporte e alimentação do pré-aquecedor ou forno;
- **PFC** – Produzido durante a cozedura do cru e libertado juntamente com gases de combustão;
- **Pó de clínquer** – Proveniente do arrefecedor e dos silos de armazenagem; e
- **Pó de cimento** – Resultante da moagem do clínquer e do empacotamento do cimento.

As emissões variam entre 0,01-0,4 kg/ton de clínquer, mas a maioria das indústrias já possui exaustores que impedem a emissão de PM<sub>10</sub> e reduzem significativamente a de PM<sub>2,5</sub>.

As restantes emissões correspondem aos óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>), ao monóxido de carbono (CO), a compostos de cloro (Cl, HCl), compostos de flúor (HF), ao amoníaco (NH<sub>3</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), a compostos orgânicos voláteis (COV), às dibenzodioxinas policloradas (PCDD), aos dibenzofuranos policlorados (PCDF) e metais pesados (Chen *et al.*, 2010; Mishra & Siddiqui, 2014; Chen, *et al.*, 2014). A emissão média de cada um dos gases é apresentada na Tabela 2.10.

**Tabela 2.10** – Emissões médias dos gases de combustão e outros poluentes emitidos durante a fabricação de cimento (fonte: adaptado de UK-EA, 2011, e EC, 2013)

Poluentes atmosféricos	Emissão média (kg/ton de clínquer)
SO <sub>x</sub>	1,60
NO <sub>x</sub>	3,19
CO	1,94
Compostos de Cl	0,02
Compostos de F	1,2x10 <sup>-3</sup>
NH <sub>3</sub>	0,01
CH <sub>4</sub>	0,04
COV	0,10
PCDD e PCDF	2,0x10 <sup>-9</sup>
Metais pesados (total)	2,7x10 <sup>-4</sup>

Os SO<sub>x</sub> resultam da combustão de sulfuretos presentes nos combustíveis fósseis ou, em menor percentagem, da oxidação de MPN. Dependentemente da origem, o SO<sub>x</sub> pode ser emitido na fase de pré-aquecimento ou apenas durante a cozedura do cru, condicionado pelo tipo de forno. Contudo, apenas 30% do SO<sub>x</sub> produzido é emitido, pois maior parte acaba por ser incorporado no clínquer (van Oss & Padovani, 2003). O NO<sub>x</sub> tem origem nos compostos de azoto presentes nos combustíveis e no

cru. O CO está associado à composição em matéria orgânica da matéria-prima. Os compostos de cloro são emitidos durante a produção do cimento e advêm do teor de cloro das matérias-primas e dos combustíveis consumidos. Dos compostos de flúor que se formam no interior do forno, mais de 90% são captados pelo clínquer, sendo que o restante acaba por sair na forma particulada juntamente com gases de combustão (IFC, 2007). O NH<sub>3</sub> tem origem na fase inicial de processamento da MPN. Os COV resultam da combustão incompleta de matéria orgânica presente na matéria-prima, ou da libertação destes compostos devido ao aumento da temperatura do cru, no sistema de pré-aquecimento e/ou pré-calцинаção (EC, 2013). A emissão de PCDD e PCDF está dependente da presença de substâncias como cloro, matéria orgânica e hidrocarbonetos, na matéria-prima utilizada (Mishra & Siddiqui, 2014). No grupo dos metais pesados estão incluídos os seguintes: Arsénio (As), Cádmiо (Cd), Crómio (Cr), Mercúrio (Hg), Níquel (Ni), Cobre (Cu) e Chumbo (Pb) (Chen, et al., 2014). As emissões de metais pesados estão diretamente correlacionadas com a sua concentração nas matérias-primas e combustíveis consumidos, quer fósseis quer alternativos.

Os efluentes de águas residuais produzidos no processo de produção resultam da água utilizada na refrigeração dos equipamentos ou de escorrências superficiais (EC, 2013). Contudo, geralmente não ocorrem emissões para a água dado que a água consumida evapora quando utilizada para a refrigeração da maquinaria, ou é reaproveitada ao longo da linha de fabrico (EC, 2013). Nos efluentes gerados pode-se verificar se a presença de matéria orgânica, metais pesados e resíduos de óleos (EC, 2013).

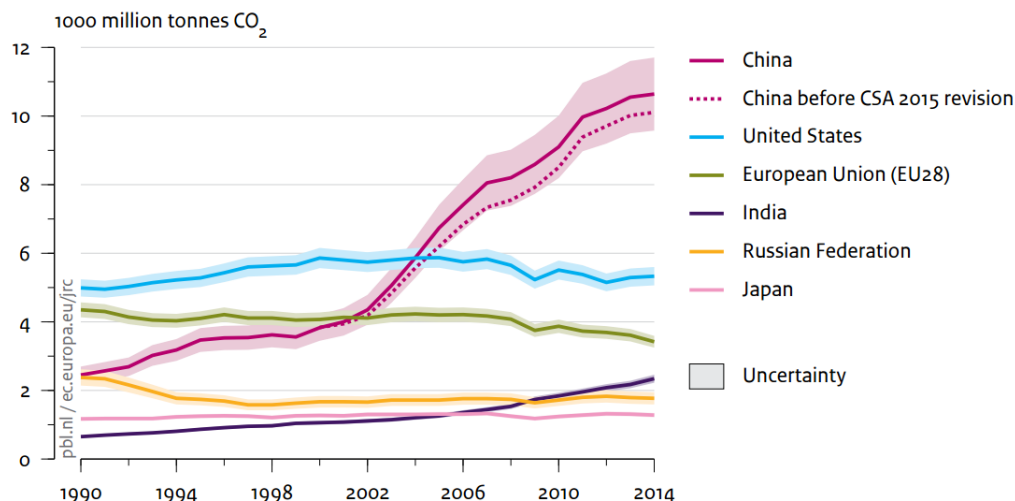
Segundo a EC (2013), ao longo do processo produção do cimento são produzidos os seguintes resíduos: rochas sem valor para o processo produtivo, obtidas na exploração das pedreiras; PFC removido pelos sistemas de *bypass*; partículas e pó acumulado nos sistemas de filtração; e resíduos do empacotamento do cimento, como papel, plásticos e madeiras.

#### **2.2.5 Impactes ambientais da produção de cimento**

A produção de cimento é responsável por diferentes pressões sobre o ambiente, tanto a nível da exploração e consumo de recursos naturais como da produção e emissão de resíduos. O impacto ambiental da indústria cimenteira evidencia-se a escalas geográficas distintas – global, regional e local – de acordo com a atuação dos diferentes efluentes do processo de produção do cimento (Habert, 2014; Van den Heede & De Belie, 2012; Josa *et al.*, 2007).

À escala global, o principal impacto da produção de cimento corresponde ao efeito de estufa e consequentes problemáticas, isto é, o aquecimento global e as alterações climáticas. Contribui também para a produção de ozono troposférico, ainda que com um menor peso. Para este problema, a responsabilidade do setor é relativa às emissões de NO<sub>x</sub>, CO e COV (Josa *et al.*, 2007). Contudo, em resultado dos elevados níveis de CO<sub>2</sub> emitidos pela indústria, correspondentes a 5% do total de emissões pelo ser humano (Cembureau, 2014), o aquecimento global é considerado o principal impacto

ambiental da indústria cimenteira. Na Figura 2.16 é apresentada a evolução das emissões de CO<sub>2</sub> discriminada pelas principais regiões industrializadas, entre 1990 e 2014.



**Figura 2.16** – Emissões globais de CO<sub>2</sub> relativas ao consumo de combustíveis fósseis e produção de cimento, por região (fonte: EC, 2014b)

Nos países desenvolvidos observa-se uma diminuição nos níveis de emissões, efeito secundário da conjuntura económica mas também do investimento em medidas de controlo e mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>. No caso da Europa, paralelamente ao efeito positivo da crise económica, a inserção da indústria do cimento no RCLE, a crescente taxa de substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos e o investimento na eficiência energética do processo industrial (no âmbito do Programa 2020) têm contribuído para a diminuição dos níveis de CO<sub>2</sub> (Usón *et al.*, 2013). Contudo, os avanços conseguidos pela colaboração dos países europeus são pouco significativos comparativamente às emissões crescentes verificadas na Ásia, na Federação Russa e em África (Cembureau, 2014), em resultado de um *boom* do setor da construção. Atualmente a principal preocupação é a China que com os elevados níveis de produção de cimento e consequente consumo de combustíveis fósseis, essencialmente carvão, é responsável por 18% das emissões do setor (Shen, *et al.*, 2014).

A nível regional, o setor do cimento contribui para a ocorrência de chuvas ácidas e para eutrofização de sistemas aquáticos (Josa *et al.*, 2007; van Oss & Padovani, 2002). As emissões da produção do cimento que contribuem para a problemática das chuvas ácidas são o SO<sub>2</sub> e o NO<sub>x</sub>, os dois principais efluentes gasosos para além do CO<sub>2</sub> (Habert, 2014). Verifica-se uma relação cíclica entre este problema ambiental e a indústria cimenteira, dado que o efeito negativo da emissão destes gases verifica-se não só a nível ambiental como também a nível material; o calcário, principal constituinte do cimento, é altamente reativo às chuvas ácidas, responsáveis pela rápida degradação do mineral (Xie *et al.*, 2004).

A eutrofização é alimentada pelas emissões de NO<sub>x</sub> que, segundo Josa *et al.* (2007), promovem um enriquecimento em nutrientes dos sistemas aquáticos. A minimização do SO<sub>2</sub> é conseguida principalmente pelo consumo de matérias-primas e combustíveis com baixo teor em sulfuretos (IFC,

2007). O controlo do NO<sub>x</sub> exige alterações mais complexas a nível do processo, dado que resulta diretamente do funcionamento do forno. A substituição de combustíveis fósseis por alternativos e o investimento na eficiência energética da etapa de cozedura do cru poderão contribuir para emissões mais baixas deste poluente.

A emissão de PFC, partículas, metais pesados, dioxinas e furanos são responsáveis pelos impactes ambientais locais. O PFC é um dos principais resíduos resultantes da produção do cimento, apesar de atualmente muitas indústrias já possuírem a tecnologia necessária para a sua reintrodução no processo. A perigosidade deste poluente para a saúde ambiental depende da presença de substâncias perigosas na matéria-prima e nos combustíveis utilizados, dado que o PFC sai do forno juntamente com os gases de combustão. Pelo facto da sua granulometria estar enquadrada no limite de partículas respiráveis, o PFC é prejudicial também para a saúde humana (Habert, 2014). Para além de mecanismos de sucção que impedem o PFC saia do forno de cimento, a carbonatação mineral é uma das técnicas que permite reduzir a carga deste poluente. Esta medida mitiga não só a perigosidade das emissões de PFC como também a carga de CO<sub>2</sub>; ao capturarem o gás, os minerais estabilizam, diminuindo o seu risco para a saúde pública (Habert, 2014).

As partículas são dos principais efluentes da produção de cimento, ocorrendo em múltiplas fases do processo. Possuem efeitos negativos sobre a qualidade do ar e, consequentemente, sobre a saúde pública quando em concentrações significativas. De modo a reduzir a emissão de partículas são instalados sistemas de filtros de mangas e precipitadores eletrostáticos, este último usualmente nos fornos de cimento (Greer *et al.*, 2000).

A emissão de metais pesados, dioxinas e furanos contribui para a contaminação dos solos e de massas de água superficiais e subterrâneas. São substâncias bioacumuláveis, que se movimentam ao longo da cadeia alimentar, alcançando o organismo humano através da ingestão de animais e/ou vegetais contaminados (Bermudez *et al.*, 2010). A minimização das emissões de metais pesados é conseguida através de sistemas de tratamento dos efluentes gasosos, como sistemas de carvão ativado, e medidas de monitorização e medição do teor de metais pesados nos recursos materiais e energéticos utilizados (IFC, 2007). A emissão de dioxinas e furanos, bem como de metais pesados, é mitigada pela substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos (Habert, 2014).



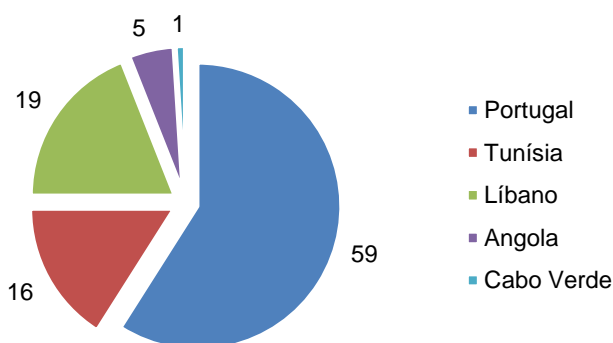


### 3 Metodologia

Este capítulo consiste na descrição detalhada do procedimento seguido na elaboração da ACV proposta. Em 3.1 é feita uma introdução ao caso de estudo da fábrica Secil-Outão, que inclui a apresentação da empresa, a análise dos seus negócios, com particular foco nos de âmbito nacional, e a caracterização geral da produção de cimento na fábrica do Outão. O subcapítulo 3.2 está dividido entre as três componentes principais da ACV. Na definição dos objetivos e âmbito são apresentadas as questões que o presente trabalho procura responder e são estabelecidas as linhas orientadoras para o seu desenvolvimento. De seguida são descritos detalhadamente os sistemas de produto em estudo, o processo de recolha de informação e os métodos de cálculo utilizados no desenvolvimento do inventário, incluindo a aplicação do *software* openLCA. Na AICV é apresentado o processo de adaptação dos resultados do ICV à base de dados *ELCD*, seguido da aplicação do método de impacte CML *baseline* para determinar a contribuição da produção de cimento para nove problemas ambientais.

#### 3.1 Caso de Estudo

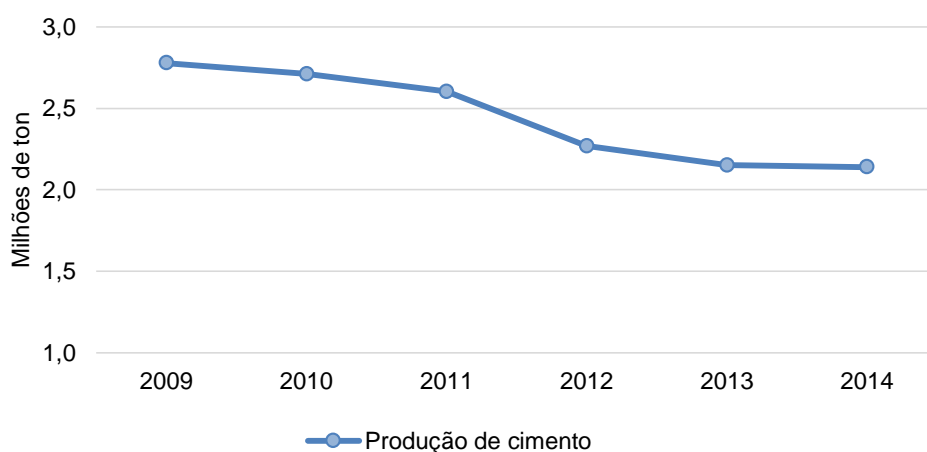
Em Portugal a indústria cimenteira surge no final do século XVIII com as Fábricas de Cimento Tejo e a Sociedade Garcia Machado Bosse & Cie. A partir desta última viria a formar-se a Companhia Geral de Cal e Cimento; a marca Secil surge em 1925. Foi marcada por um “processo de internacionalização assente na presença em países com maior potencial de crescimento e pela diversificação das operações para vários sectores na área da produção de materiais de construção” (Secil, 2014a). Apesar do principal foco ser a produção e comercialização de cimento, ao longo do tempo têm vindo a ser adotados outros projetos e linhas de produção, nomeadamente, de betão, inertes e argamassas. Atualmente encontra-se representada em Portugal, Espanha, França, Tunísia, Angola, Líbano e Cabo Verde (Figura 3.1).



**Figura 3.1** - Volume de negócios (em %) do grupo Secil nos países em que desenvolve atividade (fonte: adaptado de Secil 2014a)

As fábricas do Outão, Maceira e Pataias (Portugal), Sibline (Líbano), Gabès (Tunísia) e Lobito (Angola), correspondem às instalações do grupo com os maiores níveis de produção, sendo as que mais contribuem para a subsistência da empresa. O contexto económico global não tem sido favorável ao desenvolvimento económico das empresas ligadas ao setor da construção, e o grupo Secil enfrenta adversidades nos seus principais mercados; a fragilidade da economia portuguesa e a instabilidade sociopolítica da Tunísia e do Líbano são obstáculos ao crescimento da empresa (Secil, 2014a). Ainda assim, verificou-se um aumento de 5% no volume de negócios do grupo entre 2013 e 2014 (Secil, 2014a).

Destaca-se Portugal como a principal fonte de rendimentos do grupo e o país com a maior produtividade, responsável por mais de 50% do volume de negócios. Contudo, os níveis de produção nacionais têm apresentado uma tendência decrescente (Figura 3.2).



**Figura 3.2** – Evolução da produção de cimento do grupo em Portugal, nos anos entre 2009-2014 (fontes: adaptado de Secil 2010, 2011a, 2012, 2013a, 2014a)

A tendência do nível de produção de cimento representada acima decorre de uma quebra na atividade do setor da construção (Figura 2.10). Com o mercado interno em contínuo decréscimo, são as exportações da Secil Portugal que impedem que os níveis de produção sejam ainda mais baixos. No ano de 2014 foi atingido um recorde com a exportação de aproximadamente 1,9 milhões de ton, substancialmente superior ao consumo interno de mais ou menos 1 milhão de ton (Secil, 2014a).

Apesar da situação atual, a Secil mantém o objetivo de “ser um grupo internacional de fabrico de cimento e materiais de construção, que seja uma referência em qualidade e custos, com elevada rentabilidade, e exemplar no comportamento social e ambiental” (Secil, 2013b). Para tal tem investido em ações capazes de maximizar a produtividade e rentabilidade dos seus processos e recursos e, em simultâneo, minimizar o seu impacto no ambiente. Trata-se de medidas aplicadas tanto ao nível dos mecanismos de gestão e administração, como ao nível do processo de produção e dos sistemas naturais por ele afetado.

A preocupação com as consequências da sua atividade no ambiente levou a Secil a adotar voluntariamente boas práticas ambientais. Segundo Nascimento (2014) dentre essas medidas destacam-se: a implementação do Sistema de Gestão Ambiental (SGA) de acordo com a *ISO 14001:2004*; o registo no Sistema Comunitário de Ecogestão e Auditoria (EMAS) com integração dos Sistemas de Qualidade, Ambiente, Segurança e Saúde no Trabalho; e a criação de uma Comissão de Acompanhamento Ambiental responsável por monitorizar o desempenho ambiental das fábricas e reportá-lo ao público interessado. No que diz respeito ao processo fabril, a substituição de combustíveis fósseis por alternativos, de MPN por MPS, a redução da incorporação de clínquer no cimento e a aposta em cimentos compósitos são algumas das medidas que têm contribuído para a melhoria da sustentabilidade dos processos produtivos da Secil. Segundo Secil (2014b), a taxa de substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos alcançou os 40,8% em 2014, e a taxa de incorporação de clínquer foi de, em média, 78,2%. De modo a minimizar o impacto ambiental da atividade, estão implementados Planos de Recuperação Paisagística e Planos de Ação para a Biodiversidade que visam a requalificação das pedreiras (Secil, 2014a)

Em Portugal o grupo possui três fábricas em funcionamento: fábrica do Outão, da Maceira e de Pataias. O caso de estudo selecionado para o desenvolvimento da presente dissertação foi a fábrica de cimento Secil-Outão. Em funcionamento desde 1931, está localizada em Outão, freguesia de Anunciada, concelho e distrito de Setúbal, e inserida no Parque Natural da Arrábida, junto ao Estuário do Sado (Figura 3.3).



**Figura 3.3** – Localização geográfica da fábrica de cimento Secil-Outão (fonte: *Google Maps*).

O complexo industrial tem uma área total de 32 ha (Secil, 2013b), dividida entre a pedreira, as infraestruturas industriais, as estufas, os edifícios administrativos e de apoio aos colaboradores. A sua localização geográfica singular permite que o acesso à fábrica possa ser tanto por via terrestre como marítima. Para além do acesso rodoviário às instalações, a expedição e receção de produtos e materiais ocorrem também através de três cais acostáveis (Figura 3.4).



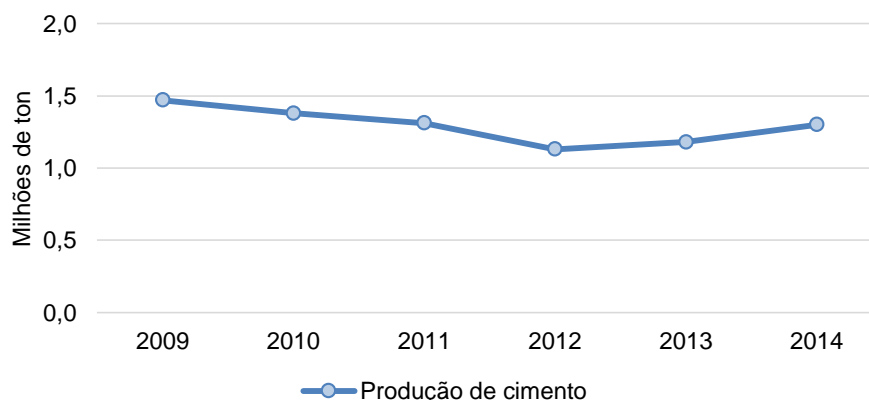
**Figura 3.4** – Fotografias da fábrica de Outão, vista aérea (à esquerda) e cais (à direita) (fontes: Secil 2011b e Google Maps)

Inicialmente, a produção de cimento na fábrica do Outão ocorria por via húmida, mas devido aos elevados consumos de água e energia, foi adotado o método de produção por via seca (Secil, 2006). Este método foi ativado em 1976 com a instalação de um novo forno, seguido da instalação do segundo em 1984. No mesmo ano, ocorreu a desativação definitiva do processo por via húmida.

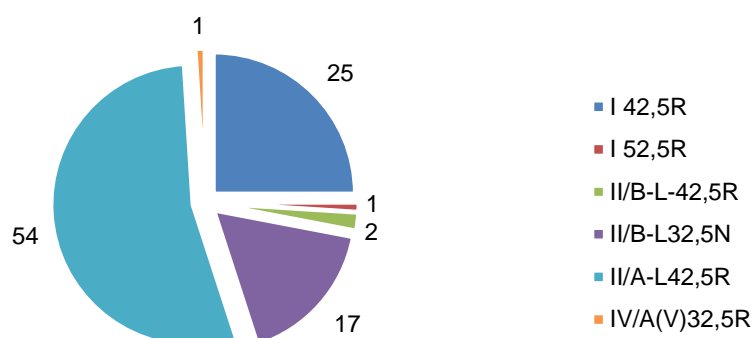
A fábrica Secil-Outão tem como principal atividade a produção de cimento cinzento, com uma capacidade instalada de 2 170 000 ton/ano (APA, 2014). A extração de minerais e a coincineração de resíduos não perigosos completam o leque de funções da instalação fabril. Segundo Secil (2013b), a fábrica do Outão compreende a produção dos seguintes tipos de cimento:

- **CEM I 42,5R e CEM I 52,5R** – Cimentos *Portland*;
- **CEM III/A-L 42,5R, CEM III/B-L 32,5N e CEM III/B-L 42,5R** – Cimentos *Portland* de calcário;
- **CEM IV/A (V) 32,5R – SR** – Cimento pozzolânico resistente a sulfatos.

Os níveis de produção de cimento entre 2009-2014 são apresentados na Figura 3.5 e o peso de cada tipo de cimento na produção total verificada no ano de 2014, na Figura 3.6.



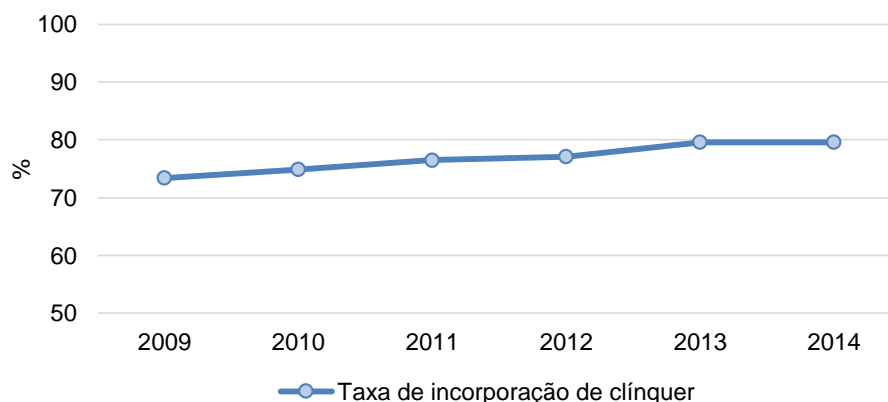
**Figura 3.5** – Evolução da produção de cimento na fábrica Secil-Outão, no período entre 2009-2014 (fonte: adaptado de Secil 2014c e 2013c)



**Figura 3.6** – Produção de cada tipo de cimento no ano de 2014 (em %) (fonte: adaptado de Secil 2014a)

Na Figura 3.5 verifica-se que até 2013 os níveis de produção da instalação do Outão acompanharam a tendência decrescente do grupo; a partir desse ano verificou-se um aumento da produção. Com base no gráfico da Figura 3.6, conclui-se que o cimento da categoria *CEM II* correspondeu a mais de 70% do cimento produzido em 2014, seguido dos cimentos do tipo I com 26% da produção total.

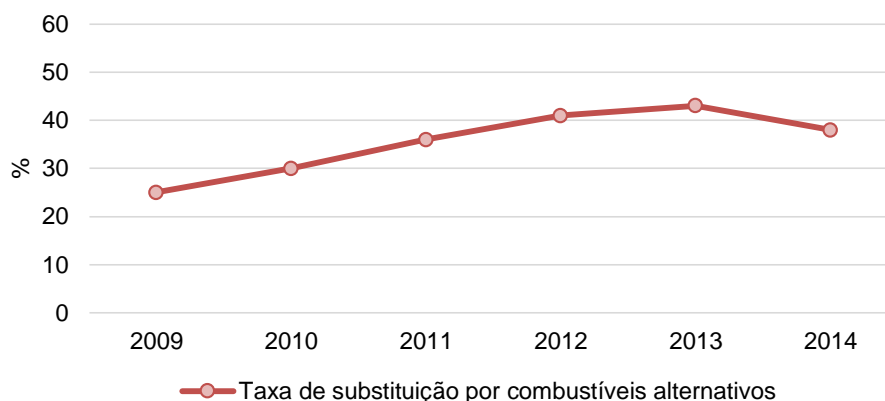
A atenção com o impacto ambiental da indústria cimenteira reflete-se também na aposta da Secil na substituição dos recursos energéticos e materiais convencionais por alternativas mais sustentáveis, bem como na redução das emissões de CO<sub>2</sub>. Na Figura 3.7 é apresentada a variação da taxa de incorporação de clínquer (TIC), na fábrica do Outão, entre 2009-2014.



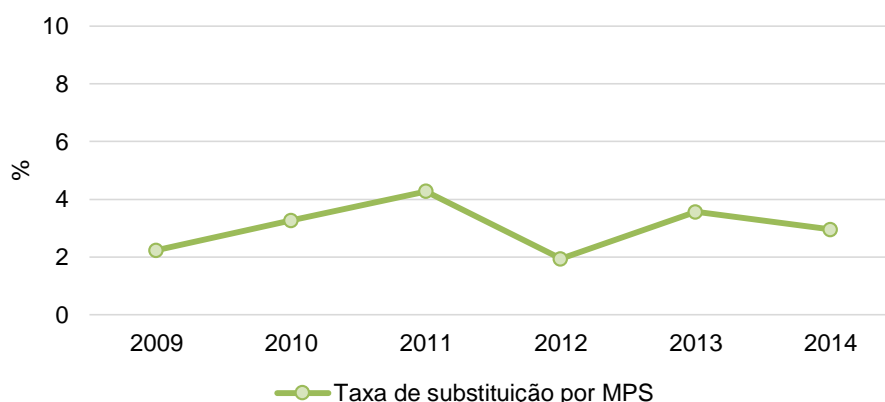
**Figura 3.7** – Evolução da TIC (em %) na fábrica Secil-Outão, entre 2009 e 2014 (fonte: adaptado de Secil 2014c e 2013c)

Com base na Figura 3.7, verifica-se um aumento gradual da incorporação de clínquer. Esta variação deve ser analisada em contexto com a qualidade e quantidade de cimento que é produzido, dado que num período em que a produção seja em grande parte de *CEM I*, a taxa de incorporação será superior do que num período em que os cimentos compósitos tenham uma maior procura. Em 2014, a TIC média foi de 79,6%.

Nas Figuras 3.8 e 3.9 são apresentadas as variações das taxas de substituição de combustíveis fósseis e MPN por combustíveis alternativos e MPS, respetivamente.



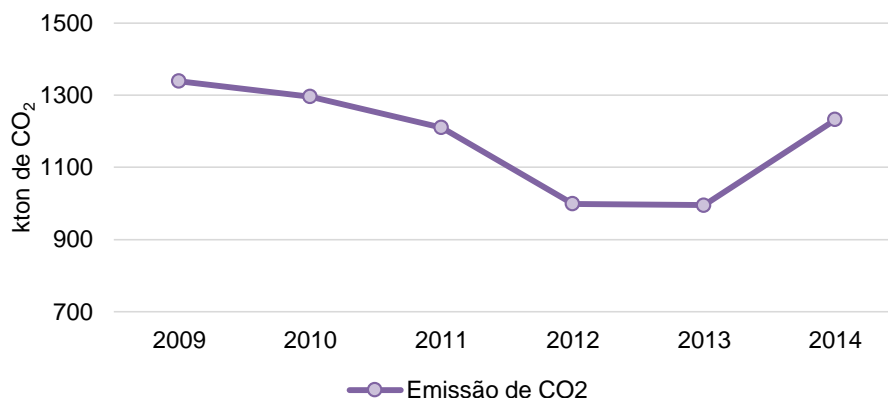
**Figura 3.8** – Evolução da taxa de substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos (em %), na fábrica Secil-Outão, entre 2009 e 2014 (fonte: adaptado de Secil 2014c e 2013c)



**Figura 3.9** – Evolução da taxa de substituição de MPN por MPS (em %), na fábrica Secil-Outão, entre 2009 e 2014 (fonte: adaptado de Secil 2014c e 2013c)

A taxa de substituição por combustíveis alternativos, representada na Figura 3.8, apresenta uma evolução crescente até 2013, sendo que no ano seguinte diminuiu. Dado que a utilização de combustíveis alternativos como recursos energéticos está dependente de propriedades específicas dos resíduos, caso os recursos existentes não satisfaçam as necessidades energéticas do processo de produção, as fontes de energia térmica convencionais terão que colmatar e/ou substituir as fontes alternativas. Em 2014 foram consumidas 123 713 ton de combustíveis alternativos, o correspondente a 38% da energia térmica consumida. A utilização de MPS (Figura 3.9) apresenta dificuldades semelhantes às do consumo de combustíveis alternativos, pois depende da disponibilidade dos materiais e da qualidade dos mesmos. O consumo de 73 413 ton de MPS em 2014, traduziu-se numa taxa de substituição de MPN de aproximadamente 3%.

Na Figura 3.10 é apresentada a variação da quantidade de CO<sub>2</sub> emitida pelo processo de produção do cimento.



**Figura 3.10** – Evolução da emissão de CO<sub>2</sub> (em kton), na fábrica Secil-Outão, entre 2009 e 2014 (fonte: adaptado de Secil 2014c e 2013c)

No que diz respeito à emissão de CO<sub>2</sub>, esta acompanha a variação dos níveis de produção de cimento, daí o aumento verificado no ano de 2014. A diminuição da taxa de substituição por combustíveis alternativos e MPS também contribui para o aumento da emissão deste GEE, dado que ocorre uma maior queima de combustíveis fósseis e a descarbonização de mais calcário.

### 3.2 Metodologia de ACV

A metodologia aplicada seguiu os requisitos principais de uma ACV expostos nas normas ISO 14040 e 14044. Foram adotados os princípios e procedimentos presentes na Norma Europeia (NE) 15804/2012, relativa a declarações ambientais de produtos de construção, complementada pelo documento de RCP do cimento e cal de construção.

#### 3.2.1 Definição dos objetivos e do âmbito

Este trabalho tem como objetivo determinar a intensidade do impacto ambiental dos processos de produção do cimento *Portland* convencional – CEM I 42,5R – e do cimento *Portland* compósito – CEM II B-L 32,5N – de modo a provar que o segundo compreende um melhor desempenho ambiental. O desenvolvimento deste estudo permitirá suportar o investimento da Secil na produção de cimentos compósitos, afirmando-o como uma alternativa sustentável ao cimento *Portland* comum. Para além disso, a própria empresa beneficia com a possibilidade deste trabalho servir de base a futuros estudos capazes de apoiar a tomada de decisões relativamente a alterações no processo de produção e medidas de prevenção da poluição e de conservação de recursos. Poderá também incentivar a restante indústria cimenteira a apostar neste tipo de cimento, dado que os benefícios ambientais refletem-se também a nível económico com a poupança de recursos materiais e energéticos. A disponibilização ao



público interessado, como clientes e competidores, melhorará a competitividade da empresa. Paralelamente, promoverá o reconhecimento do esforço da Secil na adaptação do seu negócio às necessidades atuais do mercado e da sociedade em geral, que passam pela inclusão de princípios e práticas ambientais nos processos de gestão e produção industriais.

A metodologia ACV foi aplicada a dois sistemas de produção correspondentes aos processos de fabrico dos produtos em estudo. Os sistemas são idênticos, inclusive ao nível dos fluxos de entrada e de saída, divergindo apenas a partir da etapa de moagem do cimento dado que possuem composições diferentes. A principal função de ambos os processos é a produção de cimento. Em simultâneo, este processo funciona como destino final para resíduos e coprodutos de outras indústrias quer seja através da sua valorização material, nas fases de moagem do cru e de moagem do cimento, ou da sua valorização energética para alimentação do forno de clínquer.

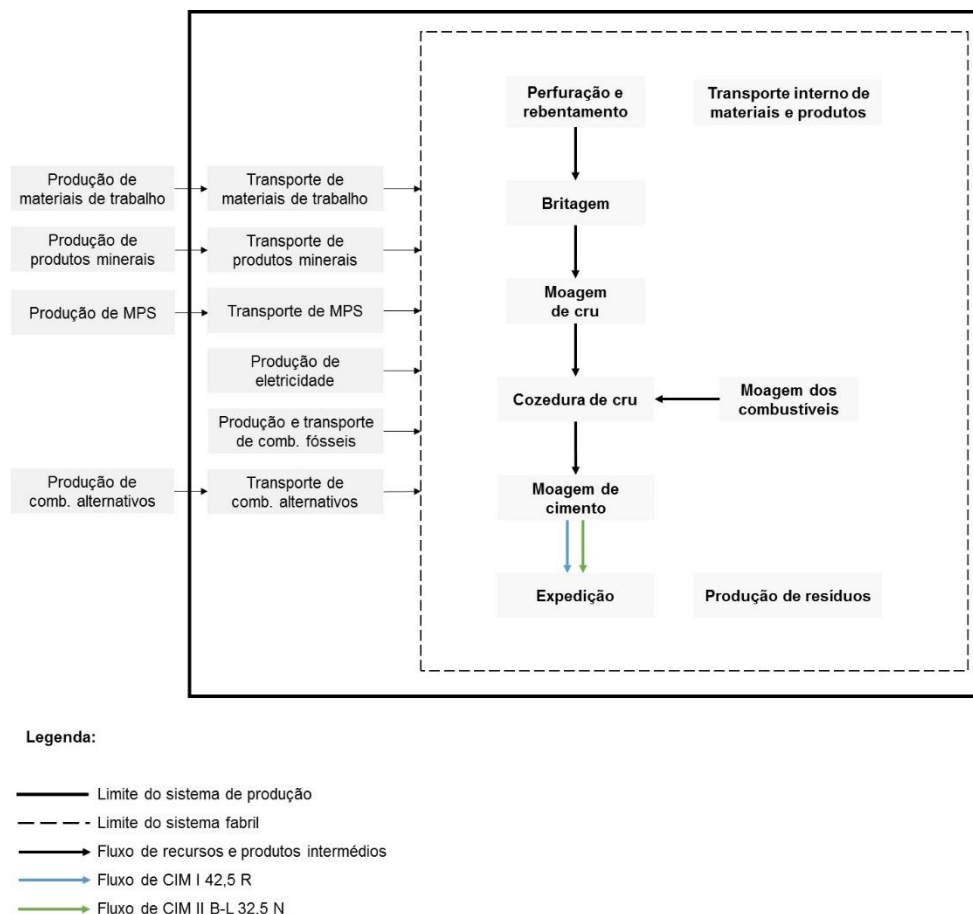
a. Definição da unidade declarada

Tendo em conta a variedade de utilidades do cimento, e a falta de informação exata sobre os processos que ocorrem nas etapas posteriores à fase de produto, optou-se por definir uma unidade declarada em substituição da unidade funcional (EC, 2010). Segundo a NE 15804/2012, “a unidade declarada é utilizada em vez da unidade funcional quando a função exata do produto [...] não é indicada ou é desconhecida; [...] deve ser aplicada quando uma DAP cobre uma ou mais etapas do ciclo de vida como módulos de informação, isto é, no caso de uma DAP “do berço ao portão” [...]”. Na análise do impacto da produção de cimento, a unidade declarada é definida como uma quantidade em unidade de massa, o quilograma (kg) (Chen *et al.*, 2010) ou a ton (García-Gusano *et al.*, 2015; Feiz *et al.*, 2015; Huntzinger & Eatmon, 2008; Marceau *et al.*, 2006; Boesch & Hellweg, 2010). Foi definida como unidade declarada uma ton de cimento.

b. Definição dos limites do sistema

Os estudos do ciclo de vida desenvolvidos segundo a abordagem atributiva requerem a definição de um sistema principal e de um sistema secundário. O sistema principal inclui as várias etapas do processo de produção do cimento, desde a extração de MPN até ao empacotamento e expedição do produto final. Compreende também a produção de energia primária e o transporte dos produtos e combustíveis para as instalações da fábrica. O sistema secundário contém os processos de produção das MPS, dos produtos minerais e dos combustíveis alternativos. Os fluxos ambientais provenientes destes processos não são considerados na ACV do cimento. Na Figura 3.11 é representado o sistema de produto contemplado no desenvolvimento da ACV do cimento.





**Figura 3.11 – Representação do sistema de produção do cimento**

A definição dos limites do sistema de produto seguiu as linhas orientadoras da NE 15804/2012 e das RCP do cimento. O sistema de produto compreende as fases do ciclo de vida do “estágio de produto”, correspondentes aos módulos de informação de A1 a A3. São incluídos os seguintes processos:

- **A1** – Extração e processamento da MPN; processamento de MPS, coprodutos e outros produtos, excluindo processos de tratamento de fim-de-vida; processamento de combustíveis fósseis e CA; produção de energia elétrica; produção de cimento.
- **A2** – Transporte de MPS, CF, combustíveis alternativos e produtos minerais para as instalações da fábrica e transporte interno de MPN;
- **A3** – Produção de cru; produção de clínquer; produção de embalagens; empacotamento e expedição.
- **A1-A3** – Tratamento dos resíduos gerados.

A ACV desenvolvida corresponde a uma análise do “berço ao portão” ou *cradle-to-gate*. Comparativamente a um estudo do “berço ao túmulo”, o tipo de análise do berço ao portão é mais adequado a um produto como o cimento tendo em conta as inúmeras aplicações e utilidades que possui, tanto a nível da produção de outros materiais de construção, como a nível da aplicação final na construção de diversas estruturas. Uma análise que englobe a fase de uso e o fim-de-vida do cimento

requer informação de difícil obtenção dada variedade de processos que podem ocorrer durante a aplicação do cimento (Feiz *et al.*, 2015; Huntzinger & Eatmon, 2008). O cimento é um material intermédio, utilizado na produção de betão e argamassa, pelo que as suas etapas de uso e fim-de-vida correspondem ao ciclo de vida dos produtos a que dá origem. Dado que o principal objetivo do trabalho é a avaliação e comparação do impacto da produção de dois tipos de cimento, adequa-se a limitação do estudo à expedição do produto final. A ACV *cradle-to-gate* do cimento está presente na literatura (Gäbel & Tillman, 2005; Valderrama *et al.*, 2012; Boesch & Hellweg, 2010) e é considerada como o tipo de ACV mais adequado na aplicação ao setor da construção (Rashid & Yusoff, 2015; Pacheco-Torgal *et al.*, 2014).

### c. Procedimentos de alocação

O processo de fabrico de cimento envolve o consumo de produtos minerais e combustíveis fósseis e a reutilização de resíduos e coprodutos de outras indústrias, como substitutos de MPN e combustíveis. Identificaram-se os seguintes processos como multifuncionais: a moagem de cru, a cozedura de cru e a moagem de cimento. Os processos de moagem valorizam fisicamente resíduos de outras indústrias, enquanto a cozedura de cru atua como serviço de tratamento de fim-de-vida através da valorização energética de resíduos.

Na presente dissertação não foram aplicados procedimentos de alocação dado que foi possível expandir o sistema de produto de modo para incluir os processos secundários. A produção dos combustíveis fósseis é incluída no estudo do ciclo de vida através da expansão do sistema de produto. Relativamente aos produtos minerais, aos resíduos e aos coprodutos, a sua produção é considerada da responsabilidade dos fornecedores (Feiz *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2010; Boesch & Hellweg, 2010; Weidema, 1999; Parkes *et al.*, 2015). Por outro lado, os fluxos ambientais decorrentes do seu transporte para a fábrica, e de processos de tratamento intermédio, são atribuídos na totalidade ao sistema de produto do cimento.

## 3.2.2 Inventário do ciclo de vida

### a. Planeamento do ICV

O desenvolvimento do ICV foi iniciado com o planeamento e determinação da informação necessária para o cumprimento do objetivo do trabalho. Para tal foi esquematizado o sistema de produto e os respetivos limites, com a identificação das etapas do processo de produção do cimento e dos processos secundários a ter em conta na execução do inventário (Figura 2.6). Tendo em conta o objetivo da ACV foram analisados dois sistemas de produção. Contudo, estes são idênticos ao longo de quase todo o

processo, divergindo apenas a partir da moagem de cimento devido às diferenças na composição do *CEM I 42,5* e do *CEM II 32,5*. A par das diferentes fases do processo de produção do cimento (delimitado pela linha a tracejado na Figura 3.11), foram incluídos na ACV os processos de produção e transporte de combustíveis fósseis, a produção de energia elétrica e o transporte de produtos minerais, MPS e combustíveis alternativos.

b. Descrição do sistema de produto

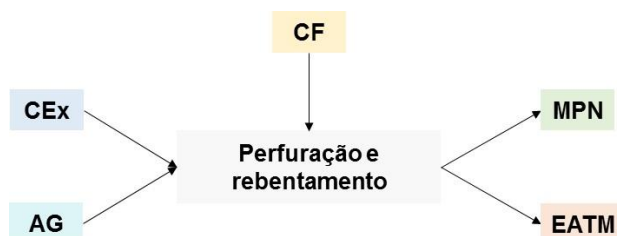
O sistema de produto compreende, para além das etapas do fabrico do cimento, os processos de produção de energia primária. Contudo, a descrição do sistema de produto foca apenas o processo de produção do cimento. A cada um dos processos unitários incluídos no sistema de produto correspondem fluxos de entrada de recursos e materiais e fluxos de saída de produtos e emissões. Cada um dos processos foi analisado detalhadamente com a finalidade de não só determinar os dados quantitativos a recolher mas também compreender a dinâmica de cada um deles. Nas figuras apresentadas ao longo deste subcapítulo serão representados cada um desses processos e respetivos *inputs* e *outputs*, segundo a legenda da Tabela 3.1.

**Tabela 3.1** – Legenda dos fluxos representados nos diagramas dos processos unitários

Inputs			
Materiais e água		Energia	
<i>CEx</i>	Cargas explosivas	<i>CF</i>	Combustíveis fósseis
<i>ME</i>	Material para empacotamento	<i>CA</i>	Combustíveis alternativos
<i>MPN</i>	Matérias-primas naturais	<i>EE</i>	Energia elétrica
<i>MPS</i>	Matérias-primas secundárias		
<i>PM</i>	Produtos minerais		
<i>AG</i>	Água		
Outputs			
Produtos intermédios e finais		Emissões	
<i>CRU</i>	Cru	<i>EATM</i>	Emissões atmosféricas
<i>CLQ</i>	Clínquer	<i>RIB</i>	Resíduos industriais banais
<i>CEM I 42,5</i>	Cimento <i>Portland I</i> (42,5 R)	<i>RIP</i>	Resíduos industriais perigosos
<i>CEM II 32,5</i>	Cimento <i>Portland II</i> (B-L 32,5 N)		

Apesar de ocorrer o consumo de água no processo de produção, segundo a Licença Ambiental (LA) n.º513/3.0/2014, não são produzidas águas residuais industriais, excetuando o efluente do sistema de refrigeração dos moinhos de cimento. Contudo, apenas a temperatura das descargas é analisada. A maior parte da água utilizada encontra-se em circuito fechado, nos sistemas de refrigeração dos fornos e dos moinhos, e é aplicada no arrefecimento dos gases de exaustão, pelo que ocorrem perdas significativas através da sua evaporação. Consequentemente, não se formam águas residuais. Em 2014, a refrigeração dos moinhos foi feita com água industrial tratada, pelo que não foram produzidas águas residuais.

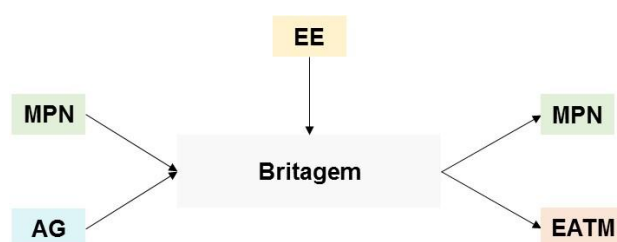
O primeiro processo incluído no sistema de produto é a perfuração e rebentamento. Nesta etapa é desenvolvida a extração de calcário e marga nas pedreiras adjacentes às instalações da fábrica. A extração de MPN ocorre através de rebentamentos de rocha, por meio de cargas explosivas inseridas em furos feitos no solo por maquinaria especializada (Secil, 2004). Os pontos em que as cargas são inseridas são estudados e definidos tendo em conta a vibração decorrente das explosões (Secil, 2013b). Os rebentamentos são planeados e executados por equipas devidamente formadas, de modo a que ocorram em segurança, sem projeção de material ou levantamento de pó (Secil, 2008). Na Figura 3.12 estão representados os fluxos de entrada e saída, associados a este processo.



**Figura 3.12** – Diagrama de fluxos do processo de perfuração e rebentamento

Ao nível dos *inputs* materiais, a etapa de perfuração e rebentamento recebe as cargas explosivas, utilizadas no desmonte de MPN nas pedreiras. Relativamente aos combustíveis fósseis, é consumido gasóleo pela maquinaria utilizada e pelos veículos pesados no transporte da MPN para o britador. Ocorre ainda o consumo de água em trabalhos da pedreira. Os *outputs* deste processo consistem no calcário e marga extraídos e na emissão de resíduos e poluentes atmosféricos. Os poluentes atmosféricos incluem tanto as partículas, em maior parte libertadas durante os rebentamentos, como os gases e substâncias com origem na combustão do gasóleo.

A etapa seguinte corresponde à britagem da matéria-prima extraída. Através de um britador de martelos, a granulometria dos blocos de rocha, com dimensões até 1 m<sup>3</sup>, é reduzida para volumes inferiores a 90 mm (Secil, 2008). Este processo permite que o material possa ser enviado para os armazéns localizados na fábrica via cintas transportadoras com uma extensão de aproximadamente 2,2 km (Secil, 2004). Em simultâneo com as cintas de borracha estão em funcionamento detetores de metais e separadores magnéticos que removem os materiais metálicos presentes na matéria-prima, impedindo que danifiquem os equipamentos das fases seguintes (Secil, 2004). Na Figura 3.13 é apresentado o diagrama de fluxos desta etapa.



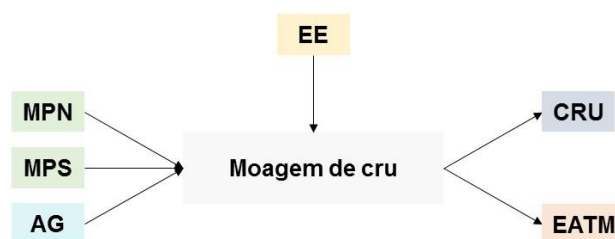
**Figura 3.13** – Diagrama de fluxos da fase de britagem

O processo de britagem da MPN tem como *inputs* a matéria-prima extraída e a energia elétrica necessária para o funcionamento do equipamento. A água é consumida na refrigeração dos equipamentos. Os *outputs* deste processo correspondem à matéria-prima britada e à emissão de partículas. As partículas têm origem no processo de britagem dos blocos de material.

O material transportado pelas cintas é armazenado em silos verticais, no caso do calcário, e em silos horizontais no caso da marga (Secil, 2008). As MPS são armazenadas em silos e armazéns próprios. Nos silos horizontais ocorre ainda o processo de pré-homogeneização da mistura de MPN e MPS. O material é depositado nos silos por camadas posteriormente misturadas por um pente mecânico (Secil, 2004). Este processo garante a uniformidade da mistura. O consumo energético do equipamento de homogeneização não é considerado isoladamente no sistema de produto pois não é feito o cálculo específico da energia elétrica utilizada neste processo. Contudo, o valor estará incluído no consumo geral de energia elétrica da fábrica, correspondente a todos os gastos elétricos que não decorrem das principais etapas do processo de produção.

A etapa de moagem de cru é precedida pela afinação da composição química da mistura de matérias-primas (Secil, 2004). Este processo, monitorizado por computadores, consiste na adição dos materiais de correção, especificamente, a areia e o óxido de ferro (Secil, 2013b). São também incorporadas as MPS, em substituição de MPN. Após a calibração da composição da mistura, esta é enviada para os moinhos de mós onde é produzido o cru.

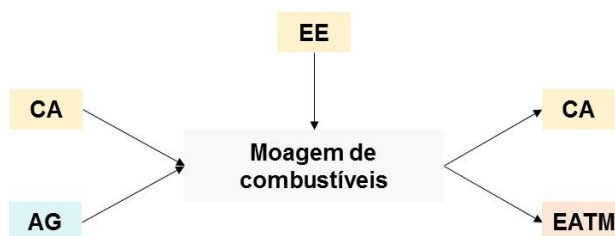
O cru corresponde a uma mistura calibrada e finamente moída, da MPN, da MPS e dos materiais de correção (Secil, 2013b). Nesta etapa ocorre ainda a secagem da mistura por contato com o calor contido nos gases de escape dos fornos, recirculados para os moinhos. Estes gases servem também de agente transportador do cru para o topo dos moinhos onde ocorre a filtração da mistura. Todos os materiais que não possuem a granulometria desejada são reencaminhados para os moinhos de cru enquanto os restantes são enviados para os silos de armazenagem (Secil, 2013b). Nos silos, o cru passa por um processo de homogeneização indispensável para garantir a qualidade do clínquer e do produto final. A Figura 3.14 corresponde ao diagrama de fluxos da moagem de cru.



**Figura 3.14 – Diagrama de fluxos da fase de moagem de cru**

Nesta fase do processo de produção do cimento, os *inputs* correspondem à mistura das MPN provenientes das pedreiras com areia, óxido de ferro, gesso, às MPS recebidas de outras indústrias e à água (utilizada nos sistemas de refrigeração). A energia elétrica fornecida é consumida pelos moinhos de cru. Os *outputs* correspondem ao cru e à emissão de partículas.

A etapa de moagem dos combustíveis consiste na trituração dos plásticos e borrachas recebidos de outros sistemas de produção, que incluem pneus usados, chips de pneus, pneus triturados, entre outros. Este processo ocorre nos moinhos de carvão. As emissões de partículas dos moinhos são minimizadas por sistemas de filtros de mangas (APA, 2014). Aquando da sua receção nas instalações da fábrica, os combustíveis alternativos são transportados para armazéns isolados dos combustíveis fósseis, de modo a evitar uma possível contaminação dos combustíveis convencionais. Na Figura 3.15 é representado o diagrama de fluxos desta fase.



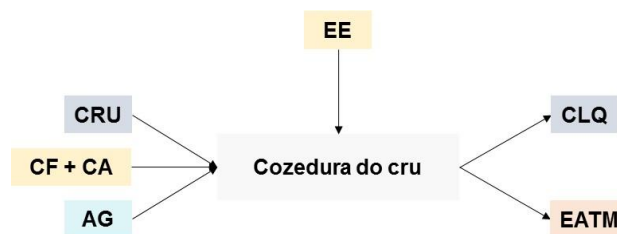
**Figura 3.15** – Diagrama de fluxos da fase de moagem de combustíveis

Consideram-se como *inputs* desta etapa os plásticos e borrachas e a energia elétrica consumida pelos moinhos de carvão. A água é consumida em serviços de lavagem e no sistema de refrigeração. Os *outputs* correspondem aos plásticos e borrachas triturados e às emissões atmosféricas dos moinhos.

A etapa de cozedura de cru é considerada a principal fase do processo dado que é responsável pela produção do clínquer, componente essencial do cimento. A clínquerização tem início nas torres de ciclone, com o pré-aquecimento do cru. Este processo ocorre através do contato entre o material e os gases de escape do forno, recirculados para o sistema de pré-aquecimento (Secil, 2013b). Nesta etapa intermédia ocorre a descarbonização do material e a sua pré-calcinação a 900 °C (Secil, 2004). O cru entra nos fornos em contracorrente com os combustíveis e sofre sucessivas reações químicas até se transformar em clínquer.

Quando a temperatura do material incandescente atinge os 1 450 °C, é iniciado o processo de arrefecimento do clínquer, que apenas termina no sistema de arrefecimento por satélites. Segundo Secil (2004), o clínquer é arrefecido dos 2 000 °C aos 150 °C através da introdução de ar em contracorrente. Devido à elevada temperatura que o ar introduzido atinge por contato com o clínquer, este é recirculado para o sistema de pré-aquecimento onde atua como ar de queima secundária (Secil, 2013b). O clínquer produzido é armazenado em silos, onde permanece até à próxima fase do processo.

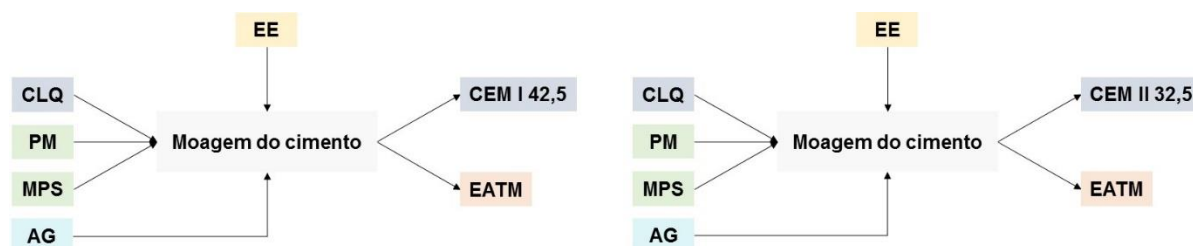
Dada as elevadas temperaturas atingidas pelos fornos, são utilizados aspersores de água no exterior para arrefecimento das máquinas. As emissões dos fornos de cimento, tanto a nível das partículas como dos gases de combustão, são respetivamente minimizadas por sistemas de despoeiramento e sistemas de controlo automatizado da condução dos fornos (Secil, 2013b). Estão instalados filtros de mangas, electrofiltros e sistemas de redução não-catalítica seletiva (SNCR). Os fornos são alimentados por uma mistura de combustíveis fósseis e alternativos. A Figura 3.16 representa o diagrama de fluxos do processo unitário da cozedura de cru.



**Figura 3.16** – Diagrama de fluxos do processo de cozedura de cru

A análise de *inputs* e *outputs* do processo de clinquerização inclui o funcionamento do sistema de pré-aquecimento, dos fornos e do sistema de arrefecimento. Os consumos energéticos e as emissões destes equipamentos são registados em conjunto e atribuídos aos fornos de clínquer. Em termos de *inputs* esta etapa recebe o cru e a mistura de combustíveis fósseis e alternativos. Os fornos consomem também energia elétrica e água para refrigeração e arrefecimento dos gases de exaustão. Os *outputs* deste processo são o clínquer e as emissões atmosféricas resultantes da descarbonização do calcário e da queima dos combustíveis.

A fase seguinte corresponde à moagem de cimento. Através de moinhos tubulares horizontais com corpos moentes (esferas de aço), é obtido o cimento (Secil, 2013b). O produto final resulta da moagem de uma mistura calibrada de clínquer, gesso e aditivos inertes como as cinzas volantes e as escórias metálicas (Secil, 2008). Tanto a volumetria dos diferentes componentes do cimento como os aditivos diferem de acordo com o tipo de cimento que é produzido. A moagem ocorre em circuito fechado e com separadores de terceira geração que permitem um maior controlo da granulometria do cimento e, consequentemente, da sua qualidade. A emissão de partículas é minimizada por sistemas de filtros de mangas. A Figura 3.17 corresponde ao diagrama de fluxos da moagem de cimento para o CEM I 42,5 e o CEM II 32,5.



**Figura 3.17**– Diagramas de fluxo da moagem de cimento I 42,5 e II 32,5

Os *inputs* do processo de moagem do CEM I 42,5 correspondem ao clínquer, aos produtos minerais (gesso e calcário), a MPS (cinzas e *filler*) e a energia elétrica. No processo de moagem do CEM II 32,5, os *inputs* são idênticos, excetuando a adição de pó de *bypass* como MPS. As quantidades de produtos minerais e MPS consumidas diferem de acordo com o tipo de cimento. Os *outputs* dos processos representados acima diferem apenas no tipo de cimento produzido. Ambos são responsáveis pela emissão de partículas.

A última etapa do processo de produção consiste na expedição do produto final. O cimento pode ser expedido em granel, cisternas (rodoviárias ou em navios) ou sacos, em paletes de madeira ou pacotes plastificados (Secil, 2008; Secil, 2013b). O peso dos sacos de cimento varia entre os 25 e os 50 kg, e cada conjunto, em palete ou pacote, pode ter entre 35-50 sacos (Secil, 2004). O ensacamento e a paletização do cimento são feitos por equipamentos automatizados. Quando devidamente embalado, o cimento é expedido via rodoviária, ferroviária ou marítima. De acordo com a quantidade de cimento e o seu meio de transporte até ao cliente, varia o tipo de embalagem em que é colocado. Na expedição por via marítima, o cimento é acondicionado em sacos plásticos designados por *big bags*. Na Figura 3.19 são apresentados os diagramas de fluxos da fase de empacotamento e expedição dos cimentos em estudo.



**Figuras 3.18** – Diagramas de fluxos da fase de expedição dos cimentos *CEM I 42,5* e *CEM II 32,5*

Para além dos respetivos produtos de cimento e da energia elétrica consumida pelas máquinas, o *input* desta etapa corresponde aos materiais de empacotamento dos produtos. Estes materiais correspondem a sacos de papel, paletes de madeira e *big bags*. Os *outputs* correspondem ao produto final embalado e às partículas emitidas durante o empacotamento do cimento.

Nas instalações da fábrica ocorrem ainda o transporte interno de MPN e a produção de resíduos. O transporte dentro das instalações da fábrica do Outão inclui a movimentação do calcário e da marga retirados da pedreira para o britador e o transporte do material britado para os silos e armazéns por meio das cintas de borracha. A produção de resíduos inclui os remanescentes provenientes da linha de produção. Os diagramas de fluxo dos processos de transporte e de geração de resíduos são representados na Figura 3.21.



**Figuras 3.19** – Diagramas de fluxo do transporte interno de MPN e da produção de resíduos

No processo à esquerda, considerou-se como *input* o combustível consumido no transporte do calcário e da marga entre as pedreiras e o britador, e o consumo de energia elétrica pela cinta transportadora. Os *outputs* dos processos representados acima correspondem, respetivamente, às emissões



atmosféricas dos veículos e aos resíduos industriais banais (RIB) e perigosos (RIP) gerados na produção do cimento.

c. Caracterização da informação recolhida

A análise comparativa da produção dos dois tipos de cimento exigiu a recolha de dados específicos relativos ao seu processo de produção, incluindo tanto as etapas principais como as secundárias. Os dados utilizados no desenvolvimento do ICV dizem respeito à produção de cimento na fábrica Secil-Outão durante o ano de 2014.

Foi recolhida informação sobre os níveis de produção de clínquer e cimento na fábrica Secil-Outão, complementada pelos dados de consumo de recursos materiais e energéticos. A maioria dos dados recolhidos diz respeito às quantidades discriminadas de MPN e MPS, de energia elétrica e de combustíveis, fósseis e alternativos, consumidos ao longo do processo de fabrico. Também foi reunida a informação relativa ao consumo de água, cargas explosivas e materiais para empacotamento. Em termos de fluxos de saída, foram recolhidos os resultados das medições sistemáticas das emissões dos moinhos de carvão, dos moinhos de cimento, dos fornos e das caldeiras. A informação sobre tipologia e quantidade de resíduos gerados também foi recolhida.

O registo, a recolha e o tratamento de todos os dados brutos são executados pelos colaboradores da fábrica, que a disponibilizam no sistema informático e/ou em relatórios mensais, semestrais e anuais. As principais fontes de informação específica ao caso de estudo foram: relatórios mensais de produção; resultados anuais de indicadores de gestão; Mapa Integrado de Registo de Resíduos (MIRR); Relatório Ambiental Anual (RAA); Declaração Ambiental Intercalar (DA); documentos de apoio à auditoria do sistema EMAS implementado; relatórios das emissões dos fornos de clínquer; registos nos *softwares* da empresa; e guias de transporte de resíduos, rececionados e enviados. Foi também consultado o ICV desenvolvido pela Secil em 2000 como parte de uma iniciativa da Cembureau focada na sustentabilidade do betão. Deste documento não foi retirada informação quantitativa dado que os dados utilizados dizem respeito ao ano de 1999, porém foi feita uma análise da adaptabilidade e adequabilidade da estrutura e metodologias aplicadas. Na Tabela 3.2 é feita a caracterização dos dados recolhidos sobre o caso de estudo.

**Tabela 3.2 – Caracterização dos dados recolhidos**

Dados		Unidade	
<i>MPN, MPS, cargas explosivas, combustíveis fósseis e alternativos e resíduos</i>		Tonelada	ton
<i>Água</i>		Metro cúbico	m <sup>3</sup>
<i>Consumo de energia elétrica</i>		Quilowatts hora	kWh
<i>Emissões atmosféricas</i>	Fornos e moinhos	Miligramas por metro cúbico (normal)	mg/Nm <sup>3</sup>
	Caldeiras	Quilograma	kg
<i>Materiais de empacotamento</i>		Número de produtos	un.

Os dados utilizados na caracterização dos processos de transporte rodoviário foram obtidos através do *software* de informação geográfica *Google Earth*, que permitiu o cálculo da distância (em quilómetros) entre os fornecedores e a fábrica Secil-Outão. A identificação dos fornecedores dos materiais foi feita com recurso ao MIRR do ano de 2014 e junto dos colaboradores da Secil-Outão.

d. Procedimentos de atribuição de fluxos e métodos de cálculo

Os dados recolhidos para o desenvolvimento do ICV foram, sempre que possível, atribuídos a processos unitários específicos. Os fluxos referentes ao consumo de eletricidade, de água e à produção de resíduos envolveram outros métodos de atribuição.

Existem, para além dos consumos específicos de eletricidade do britador, dos moinhos e dos fornos, uma parte do consumo designado por consumo geral da fábrica. De acordo com os registos oficiais da fábrica Secil-Outão, 40% do consumo geral da fábrica é atribuído à fase de expedição. Os restantes 60% distribuem-se entre serviços vários de apoio ao processo de produção. Esta parcela do consumo de eletricidade foi associado ao processo de cozedura do cru, tendo em conta a relevância da etapa no global do processo de produção e de ser aquela que exige maior manutenção e monitorização. Quanto ao consumo de água subterrânea, não existem dados discriminados dos pontos de consumo nas várias etapas do processo de produção, por isso, este fluxo de entrada foi dividido igualmente pelos sete processos analisados.

Relativamente às emissões atmosféricas, para além da medição sistemática das emissões de partículas dos fornos e dos moinhos de carvão e cimento, são estimadas as emissões difusas de partículas. Este valor foi dividido igualmente pelas etapas do processo em que a emissão de partículas é reconhecida como um *output* mas não é feita a sua determinação exata: perfuração e rebentamento; britagem; moagem de cru; e expedição.

Os resíduos gerados pelo processo de produção também são tidos em conta, contudo não foi possível determinar a origem específica de todos. Foram incluídos no inventário dezanove tipologias de resíduos, das quais para apenas cinco existia informação referente ao equipamento de origem. Tendo em conta a informação recolhida, foi definido o processo de origem (Tabela 3.3), enquanto os restantes resíduos foram incluídos no processo unitário de produção de resíduos.

**Tabela 3.3 – Atribuição dos resíduos gerados ao processo unitário de origem**

Resíduo		Equipamento de origem	Processo de origem
RIB	Refratários	Fornos de clínquer	Cozedura de cru
	Resíduos de construção e demolição	Fornos de clínquer	Cozedura de cru
	Resíduos de betão e lamas de betão	Fornos de clínquer	Cozedura de cru

**Tabela 3.3 – Atribuição dos resíduos gerados ao processo unitário de origem (cont.)**

Resíduo		Equipamento de origem	Processo de origem
RIB	<i>Granalha usada</i>	Moinhos de cimento	Moagem de cimento
	<i>Cintas transportadoras de borracha</i>	Cinta transportadora	Britagem
RIP	<i>Resíduos contaminados com hidrocarbonetos</i>	Moinho de cru	Moagem de cru

Os cálculos efetuados no desenvolvimento do ICV tiveram como principais finalidades a quantificação dos fluxos identificados no sistema de produto e a sua conversão à unidade declarada. Incluem: a determinação da energia térmica resultante dos combustíveis; a conversão das medições de emissões atmosféricas; e a conversão à unidade declarada.

A energia térmica associada aos combustíveis fósseis e alternativos consumidos foi determinada com base na seguinte equação:

$$(1) ET = PCI \times Consumo$$

Em que:

**ET** – Energia térmica obtida (em GJ);

**PCI** – Poder calorífico inferior (em GJ/ton);

**Consumo** – Consumo de combustível (em ton).

Os valores de PCI utilizados coincidem com os aplicados pela Secil no cálculo da energia obtida pela incineração dos combustíveis, e são apresentados na Tabela 3.4.

**Tabela 3.4 – Valores de PCI utilizados no cálculo da energia térmica obtida através dos combustíveis (fonte: Secil, 2014d)**

Combustível	PCI (GJ/ton)
<i>GPL</i>	48,45
<i>Gasóleo</i>	43,07
<i>Fuelóleo</i>	40,28
<i>Coque de petróleo (valor médio)</i>	32,40
<i>Plásticos e borrachas</i>	26,75
<i>CDR</i>	14,27
<i>Fluff</i>	29,04
<i>Resíduos industriais perigosos</i>	24,27
<i>Biomassa vegetal</i>	16,22

A Secil mede sistematicamente as emissões atmosféricas dos fornos de cimento, das caldeiras, dos moinhos de carvão e dos moinhos de cimento. Apenas os dados relativos às emissões das caldeiras foram recolhidos já na forma de emissões efetivas. As emissões dos fornos e dos moinhos são registadas na forma de concentrações normalizadas. Para calcular as emissões efetivas de cada poluente, foi aplicada a seguinte equação:

$$(2) E_{poluente} = (E_N \times 10^{-3}) \times (Q_h \times Horas)$$

Em que,

**E<sub>poluente</sub>** – Emissão efetiva do poluente atmosférico (em g);

**E<sub>n</sub>** – Concentração normalizada do poluente (em mg/Nm<sup>3</sup>);

**Q<sub>h</sub>** – Caudal horário do forno ou moinho de clínquer (em Nm<sup>3</sup>/h);

**Horas** – Horas de funcionamento do forno ou moinho (em h).

Relativamente aos fornos, são medidos os seguintes poluentes: CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, HCl, HF, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, COVNM, PM<sub>10</sub>, metais pesados e PCDD/PCDF. Nos moinhos de carvão e cimento, o único poluente medido é o PM<sub>10</sub>. Relativamente aos moinhos de cimento, a Secil-Outão determina a emissão específica de partículas para cada tipo de cimento, dado que existem registos das horas de funcionamento dos moinhos por tipo de cimento produzido.

A normalização dos *inputs* e *outputs* em relação à unidade declarada foi feita de igual modo em cinco das etapas analisadas, aplicando-se um procedimento diferente nas fases de moagem de cimento e expedição. As fases do processo anteriores à moagem de cimento dizem respeito à produção de clínquer, logo, são idênticas para os diferentes tipos de cimento. Para ser possível distinguir as exigências materiais e energéticas e as cargas ambientais dos dois produtos de cimento ao longo desta parcela do processo de produção, recorreu-se à TIC dos cimento analisados. A equação seguinte representa o cálculo efetuado:

$$(3) Fluxo_{clq} = \frac{Fluxo}{CLQ_{total}} \times TIC$$

Em que,

**Fluxo<sub>clq</sub>** – Fluxo normalizado a 1 ton de clínquer (em unidade do fluxo/ton de clínquer);

**Fluxo** – Quantidade do fluxo (na unidade do fluxo);

**CLQ<sub>total</sub>** – Total de clínquer produzido (em t);

**TIC** – Taxa de incorporação do clínquer no cimento (em %).

Os valores de TIC utilizados na conversão dos fluxos para a unidade funcional constam da Tabela 3.5. O cimento do tipo I compreende o consumo de 0,914 ton de clínquer/ton de cimento, enquanto a produção do cimento do tipo II exige um consumo de 0,654 ton de clínquer/ton de cimento.

**Tabela 3.5** – Valores de TIC utilizados na normalização dos fluxos (fonte: Secil, 2014b)

Cimento	TIC (em %)
CEM I 42,5 R	91,4
CEM II B-L 32,5 N	65,4

Nas fases de moagem de cimento e expedição, sempre que possível foi utilizada informação específica a cada um dos tipos de cimento. Em relação aos consumos de MPN, MPS e de energia elétrica, a conversão destes valores para a unidade funcional é feita com base no total de cimento (*CEM I 42,5* ou *CEM II 32,5*) produzido:

$$(4) \text{ Fluxo}_{\text{cim}} = \frac{\text{Fluxo}}{\text{CIM}_{\text{esp}}}$$

Em que,

**Fluxo<sub>cim</sub>** – Fluxo normalizado a 1 ton de cimento específico (em unidade do fluxo/ton de cimento);

**Fluxo** – Quantidade do fluxo (na unidade do fluxo);

**CIM<sub>esp</sub>** – Total de cimento específico produzido (em ton).

A informação disponível relativa ao consumo de água e à emissão difusa de partículas corresponde ao gasto de todo o processo de produção, não havendo distinção entre as diferentes categorias de cimento. Nas etapas de moagem de cimento e expedição, a normalização destes fluxos foi desenvolvida com base na seguinte equação:

$$(5) \text{ Fluxo}_{\text{cim total}} = \frac{\text{Fluxo}}{\text{CIM}_{\text{total}}}$$

Em que,

**Fluxo<sub>cim total</sub>** – Fluxo normalizado para a produção total de cimento (em unidade do fluxo/ton de cimento);

**Fluxo** – Quantidade do fluxo (na unidade do fluxo);

**CIM<sub>total</sub>** – Total de cimento produzido (em ton).

A substituição do CIM<sub>esp</sub> pelo CIM<sub>total</sub> evita que a diferença entre os resultados do ICV dos cimentos do tipo I e II decorra diretamente da discrepância entre os níveis de produção de cada um, o que não seria representativo da realidade. Tendo em conta que a produção de *CEM I 42,5* foi superior à de *CEM II 32,5* em 2014, o fluxo normalizado do consumo de água, segundo a equação (4), seria obrigatoriamente inferior para o cimento do tipo I.

A normalização dos fluxos do processo de produção de resíduos segue o procedimento da equação (5). Não sendo possível atribuir os fluxos de resíduos a processos específico, foram considerados como um *output* do processo global. Na sua conversão para a unidade funcional, foram tidos em conta os dados de produção total de cimento no ano de 2014.

e. Aplicação do software openLCA no ICV

Para completar o ICV da produção de cimento e, posteriormente, no desenvolvimento da avaliação de impacto, foi aplicado o software openLCA. A sua utilização exige a seleção de uma base de dados de ICV que, tendo em conta os fluxos elementares e de produtos que compreende, condicionou a adaptação dos resultados do inventário. A base de dados escolhida foi a *European Life Cycle Database (ELCD)*, criada em 2006 pelo *Joint Research Centre* da CE. A *ELCD* inclui uma vasta coleção de dados de ICV proveniente de organizações europeias e validadas pelas indústrias a que pertencem. Esta base de dados disponibiliza gratuitamente informação sobre os fluxos associados a variados processos de produção em contexto europeu. A *ELCD* é geralmente utilizada por meio de softwares de ACV, com o objetivo de se desenvolverem ICV e/ou avaliações de impacto de sistemas de produto.

O software openLCA, em simultâneo com a base de dados *ELCD*, foi utilizado com o objetivo de completar o ICV do sistema de produto com a informação relativa à produção da energia primária e ao transporte dos materiais e recursos consumidos na produção do cimento. A energia primária inclui a energia elétrica e os combustíveis fósseis consumidos. Na *ELCD* apenas estão disponíveis os processos de produção da eletricidade, do fuelóleo (consumido nos fornos de clínquer) e do gasóleo (consumido nos trabalhos das pedreiras). Na Tabela 3.6 constam os processos da *ELCD* atribuídos à produção dos recursos e materiais indicados anteriormente.

**Tabela 3.6 – Processos da *ELCD* atribuídos à produção de energia primária**

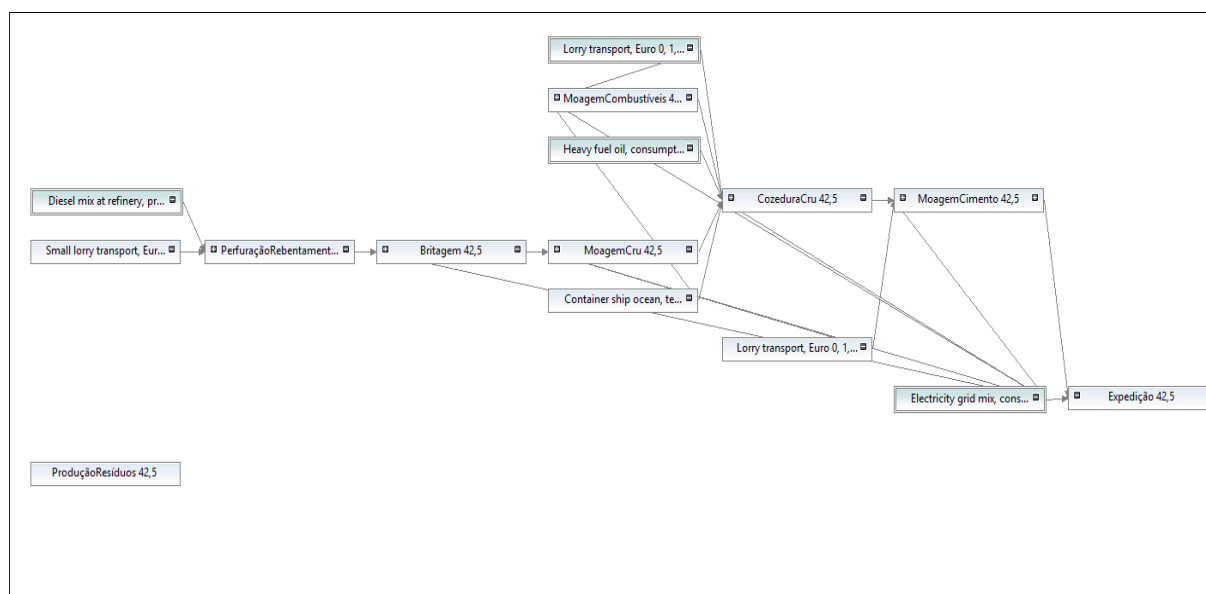
Processo	Processo equivalente na <i>ELCD</i>
<i>Produção de eletricidade</i>	“Electricity grid mix, 230 V – PT”
<i>Produção de fuelóleo</i>	“Heavy fuel oil”
<i>Produção de gasóleo</i>	“Diesel mix at refinery”

No ICV foram identificados o transporte rodoviário e o marítimo. A base de dados *ELCD* compreende dois fluxos para processos de transporte: “transport in ton\*km” e “cargo”. O primeiro é quantificado com base na quantidade transportada e na distância percorrida; o segundo tem em conta apenas a quantidade transportada. Foi definido como fluxo padrão o “cargo”. Porém, como o software não permite a repetição de fluxos, foi necessário utilizar os dois fluxos sempre que, no mesmo processo, ocorria o transporte por via rodoviária e por via marítima. Esta situação verifica-se nos processos de moagem de combustíveis e de cozedura do cru. Nestes casos, ao transporte rodoviário foi aplicado o fluxo “transport in ton\*km” e, ao transporte marítimo, o fluxo “cargo”. Para obter os dados de inventário foi atribuído a cada fluxo um processo de transporte, o que permite distinguir as pressões ambientais do transporte rodoviário e marítimo (Tabela 3.7).

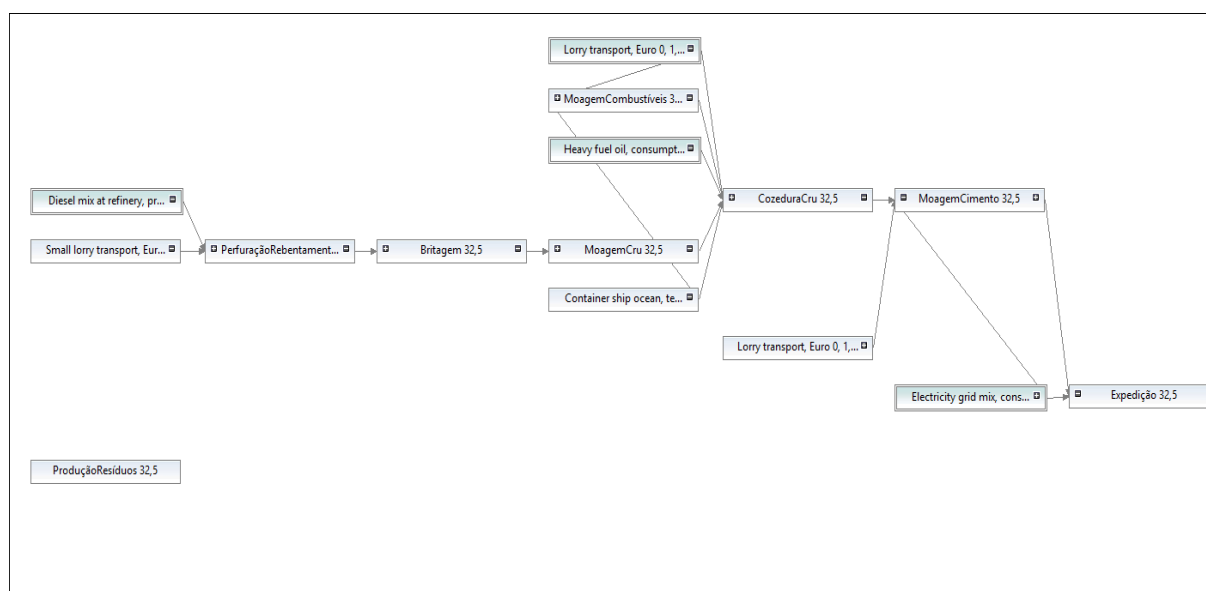
**Tabela 3.7 – Meios de transporte atribuídos aos processos de transporte do sistema de produto**

Processos	Fluxos de transporte	Meio de transporte
Perfuração e rebentamento	“carga”	“Small lorry transport”
Moagem de combustíveis e cozedura de cru	“carga”	“Container ship”
	“transport in ton*km”	“Lorry transport”
Restantes processos	“carga”	“Lorry transport”

A aplicação do openLCA permitiu a construção dos sistemas de produto dos cimentos em estudo. Nas Figuras 3.22 e 3.23 são apresentados, respetivamente, os esquemas da produção do cimento I 42,5 e do cimento II 32,5 que incluem a produção de energia primária e os processos de transporte.



**Figura 3.22 – Esquema do sistema de produto do cimento I 42,5 construído no *software* openLCA**



**Figura 3.23 – Esquema do sistema de produto do cimento II 32,5 construído no *software* openLCA**

### 3.2.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida

#### a. Conversão dos resultados do ICV

O *software* openLCA foi utilizado para desenvolver a avaliação de impacto do processo de produção do cimento. Como referido anteriormente, foi selecionada a base de dados *ELCD* como suporte do inventário desenvolvido, e segundo a qual foram transpostos os resultados para o *software* de ACV.

Foi necessário adaptar os fluxos do ICV aos fluxos disponíveis na base dados, tanto ao nível de *inputs* como de *outputs*. Contudo não foi possível atribuir fluxos equivalentes a todos os que foram quantificados no inventário devido às limitações da *ELCD*. As cargas explosivas e os materiais de empacotamento (pacotões, paletes e *big bags*) foram os únicos fluxos de entrada para os quais não foi possível encontrar equivalentes minimamente realistas. Na Tabela 3.8 é apresentada a equivalência entre os fluxos de MPN, água, combustíveis fósseis e de energia elétrica e os fluxos da *ELCD*, com indicação da alocação em percentagem.

**Tabela 3.8** – Equivalência entre fluxos de entrada do ICV e os fluxos da *ELCD* (com respetiva alocação, em %)

Fluxos de entrada ICV	Fluxos de entrada <i>ELCD</i>	%
<i>Calcário (extraído, próprio e adquirido)</i>	“Limestone, in ground”	100
<i>Marga</i>	“Calcium carbonate, in ground”	50
	“Clay, unspecified, in ground”	50
<i>Areia</i>	“Very fine milled silica sand”	100
<i>Óxido de ferro</i>	“Iron ore, unspecified”	100
<i>Gesso</i>	“Gypsum stone (CaSO <sub>4</sub> -dihydrate)”	100
<i>Água subterrânea</i>	“Water, ground”	100
<i>Gasóleo</i>	“Diesel”	100
<i>Fuelóleo</i>	“Heavy fuel oil”	100
<i>Coque de petróleo</i>	“Secondary fuel”	100
<i>Energia elétrica</i>	“Electricity”	100

A maioria dos fluxos analisados no ICV possui um equivalente na base de dados *ELCD*. Sempre que possível, a atribuição de um fluxo do ICV a um fluxo da base de dados foi feita na totalidade (alocação de 100%). A categoria “unspecified” compreende os fluxos de origem desconhecida. A marga não consta da lista de fluxos da base de dados, por isso a sua equivalência teve como base a sua composição em carbonato de cálcio e argila, ambos incluídos na *ELCD*. O consumo de óxido de ferro foi considerado equivalente ao consumo de ferro em mineral. O coque de petróleo também não está incluído na base de dados. Foi considerado como um combustível secundário dado que é um coproduto da refinaria de petróleo (Andrews & Lattanzio, 2013).



As MPS (Tabela 3.9) e os combustíveis alternativos (Tabela 3.10) também foram adaptados à base de dados *ELCD*.

**Tabela 3.9** – Equivalência entre os fluxos de MPS e os fluxos da *ELCD* (com respetiva alocação, em %)

Fluxos de MPS no ICV	Fluxos de MPS na <i>ELCD</i>	%
<i>Gravilhas e fragmentos de rochas</i>	“Demolition waste (unspecified)”	100
<i>Mistura betão, tijolos e ladrilhos</i>		100
<i>Rejeitados de pó</i>		100
<i>Poeiras e pós</i>		100
<i>Filler</i>		100
<i>Substâncias minerais</i>	“Mineral waste”	100
<i>Outros resíduos minerais não especificados</i>		100
<i>Rejeitados de placas</i>		100
<i>Resíduo granular cinzento</i>		100
<i>Outros resíduos incluindo mistura de materiais</i>		100
<i>Mistura de resíduos de cal</i>	“Waste for recovery (unspecified)”	100
<i>Resíduos de calcinação e hidratação de cal</i>		100
<i>Lamas de cal</i>	“Production residues (unspecified)”	100
<i>Lamas de ETAR</i>		100
<i>Refratário usado</i>	“Sludge from processing (for recovery)”	100
<i>Outros revestimentos de fornos</i>		100
<i>Resíduos cálcicos (reação sulfogesso)</i>	“Refractory (for recovery)”	100
<i>Granalha</i>		100
<i>Cinzas</i>	“Gypsum (for recovery)”	100
	“Steel scrap (for recovery)”	100
	“Mineral waste (ash)”	100

**Tabela 3.10** – Equivalência entre os fluxos de combustíveis alternativos e os fluxos da *ELCD* (com respetiva alocação, em %)

Fluxos de combustíveis alternativos no ICV	Fluxos de combustíveis alternativos na <i>ELCD</i>	%
<i>Plásticos e borrachas</i>	“Plastics, unspecified (for recovery)”	100
<i>CDR</i>	“Waste incineration of municipal solid waste”	100
<i>RIP</i>	“Hazardous waste (unspecified)”	100
<i>Biomassa vegetal</i>	“Waste incineration of wood products”	100

No que diz respeito aos fluxos de saída, nas Tabelas 3.11 e 3.12 são apresentadas, respetivamente, as equivalências para as emissões atmosféricas e para os resíduos gerados.

**Tabela 3.11** – Equivalência entre os fluxos de emissões atmosféricas e os fluxos da *ELCD* (com respetiva alocação, em %)

Fluxos de emissões atmosféricas no ICV	Fluxos de emissões na <i>ELCD</i>	%
CO <sub>2</sub>	“Carbon dioxide, fossil”	1
	“Carbon dioxide”	2
SO <sub>2</sub>	“Sulfur dioxide”	100

**Tabela 3.11 – Equivalência entre os fluxos de emissões atmosféricas e os fluxos da *ELCD* (com respectiva alocação, em %) (cont.)**

Fluxos de emissões atmosféricas no ICV	Fluxos de emissões na <i>ELCD</i>	%
<i>NO<sub>x</sub></i>	"Nitrogen oxides"	100
<i>CO</i>	"Carbon monoxide"	100
<i>HCL</i>	"Hydrogen chloride"	100
<i>HF</i>	"Hydrogen fluoride"	100
<i>NH<sub>3</sub></i>	"Ammonia"	100
<i>CH<sub>4</sub></i>	"Methane"	100
<i>COVNM</i>	"Non-methane volatile organic compounds"	100
<i>PM<sub>10</sub></i>	"Particulate <10"	100
<i>As; Cd; Cr; Cu; Hg; Ni; Pb; Zn; Ti</i>	"Arsenic; Cadmium; Chromium; Copper; Mercury; Nickel; Lead; Zinc; Thallium"	100
<i>PCDD/PCDF</i>	"Dioxins and furans, unspecified"	100

**Nota:** <sup>1</sup> CO<sub>2</sub> de origem fóssil; <sup>2</sup> CO<sub>2</sub> com origem em combustíveis alternativos e na descarbonização do calcário.

**Tabela 3.12 – Equivalência entre os fluxos de resíduos do ICV e os fluxos da *ELCD* (com respectiva alocação, em %)**

	Fluxos de resíduos no ICV	Fluxos de resíduos na <i>ELCD</i>	%
<b>RIB</b>	<i>Refratários usados</i>	"Refractory (for recovery)"	100
	<i>Resíduos de betão e lamas de betão</i>	"Demolition waste"	100
	<i>Resíduos de construção e demolição</i>		100
	<i>Sucata metálica</i>	"Heavy metals (waste)"	100
	<i>Cabos metálicos</i>		100
	<i>Mistura de metais</i>		100
	<i>Granalha usada</i>	"Steel scrap (for recovery)"	100
	<i>Cintas transportadoras de borracha</i>	"Plastic (unspecified, for recovery)"	100
	<i>Mistura de resíduos</i>	"Waste for recovery (unspecified)"	100
<b>RIP</b>	<i>Líquidos de lavagem com hidrocarbonetos</i>	"Hazardous organic waste for disposal"	100
	<i>Óleos hidráulicos</i>	"Used oil"	100
	<i>Água com óleo (separadores de óleo)</i>	"Waste water untreated"	50
		"Used oil"	50
	<i>Lamas de óleos (separadores de óleo)</i>	"Sludge (Hazardous)"	100
	<i>Massas lubrificantes</i>		100
	<i>Resíduos contendo hidrocarbonetos</i>	"Hazardous waste (production residue)"	100
	<i>Outros combustíveis incluindo misturas</i>	"Hazardous waste"	100
	<i>Embalagens metálicas</i>	"Packaging waste (metal)"	100
	<i>Absorventes e materiais filtrantes contaminados</i>	"Waste (solid, hazardous)"	100
	<i>Filtros de óleo</i>		100

Tal como na adaptação das MPS, não foi possível manter a especificidade dos resíduos gerados. Nos casos comuns, as equivalências dos resíduos foram coerentes com as atribuídas às MPS.

b. Seleção das categorias e indicadores de impacto e dos modelos de caracterização

Neste trabalho foi aplicada uma abordagem ao nível do problema tendo em conta que os seus resultados são considerados mais fidedignos (Chen *et al.*, 2010; Van den Heede & De Belie, 2012). Para além disso, dado ao interesse de determinar e comparar o contributo da produção de dois produtos distintos para problemas ambientais existentes, considerou-se adequada a escolha de uma abordagem que permitisse essa especificidade.

Em linha com a abordagem escolhida, foi aplicado o método de avaliação de impacto CML *baseline* (versão 4.4 de Janeiro de 2015). Esta metodologia de AICV, desenvolvida pela Universidade de Leiden (Holanda), inclui as categorias de impacto geralmente utilizadas em estudos do ciclo de vida. De modo a garantir a adequabilidade do método ao caso de estudo, foi feita uma análise cruzada entre os impactos considerados padrão na NE 15804/2012, os impactos incluídos no método CML (Guinée, *et al.*, 2004) e os identificados na pesquisa desenvolvida sobre as pressões ambientais da produção de cimento (Feiz *et al.*, 2015; García-Gusano *et al.*, 2015; Josa *et al.*, 2007; Van den Heede & De Belie, 2012). Os impactos ambientais definidos foram:

- **Depleção de recursos abióticos** – Expressa o impacto da extração de recursos naturais considerados “não vivos”, como minerais e combustíveis fósseis.
- **Aquecimento global** – Representa a degradação da qualidade dos ecossistemas e das condições de vida na Terra, em consequência da contribuição dos GEE para a absorção do calor de radiação na atmosfera.
- **Depleção do ozono estratosférico** – Reproduz a contribuição das emissões antropogénicas para a destruição da camada do ozono.
- **Acidificação** – Respeitante aos efeitos da deposição de substâncias acidificantes no solo, em massas de água e em edifícios, bem como do seu contato com organismos.
- **Eutrofização** – Consiste no enriquecimento de massas de água ou do solo em nutrientes (nitratos e fosfatos), capaz de provocar alterações nefastas na composição e diversidade de espécies dos ecossistemas afetados.
- **Formação de ozono troposférico** – Compreende a formação de compostos químicos reativos na troposfera, por incidência da luz solar em poluentes primários;
- **Toxicidade para o ser humano** – Impacte na saúde humana da presença de determinadas substâncias tóxicas no ambiente.
- **Ecotoxicidade para sistemas dulçaquícolas, marinhos e terrestres** – Englobam, respetivamente, os impactos da presença de substâncias tóxicas em sistemas de água doce, de água salgada e terrestres.

O método CML *baseline* possui um modelo de caracterização próprio no qual estão definidos os indicadores de impacto e respetivos fatores de caracterização. As categorias de impacto e respetivos indicadores e fatores de caracterização constam da Tabela 3.13.

**Tabela 3.13** – Categorias de impacto e respetivos indicadores e fatores de caracterização

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Indicador de impacto</b>	<b>Fator de caracterização</b>	<b>Descrição do fator de caracterização</b>
<i>Depleção de recursos abióticos - Elementos</i>	Consumo de elementos naturais	Potencial de depleção recursos abióticos	<b>PDRA-E</b> kg de antimónio eq.
<i>Depleção de recursos abióticos - Fósseis</i>	Consumo de recursos abióticos fósseis	Potencial de depleção recursos abióticos	<b>PDRA-F</b> MJ
<i>Alterações climáticas</i>	Emissão de GEE	Potencial de aquecimento global	<b>PAG</b> (horizonte 100) kg de CO <sub>2</sub> eq.
<i>Depleção do ozono estratosférico</i>	Emissão de substâncias destruidoras da camada de ozono	Potencial de destruição da camada de ozono	<b>PDCO</b> (horizonte infinito) kg CFC-11 eq.
<i>Acidificação</i>	Emissão de substâncias acidificantes	Potencial de acidificação	<b>PA</b> (média europeia) kg de SO <sub>2</sub> eq.
<i>Eutrofização</i>	Emissão de nitratos e fosfatos	Potencial de eutrofização	<b>PE</b> (genérico) kg de PO <sub>4</sub> eq.
<i>Formação de ozono troposférico</i>	Emissão de substâncias tóxicas para a saúde humana	Potencial de oxidação fotoquímica	<b>POF</b> (NO <sub>x</sub> alto) kg de etileno eq.
<i>Toxicidade para a saúde humana</i>	Emissão de substâncias tóxicas para a saúde humana	Potencial de toxicidade humana	<b>PTH</b> (horizonte infinito) kg de 1,4-diclorobenzeno (DCB) eq.
<i>Ecotoxicidade para sistemas dulçaquícolas</i>	Emissão de substâncias tóxicas para sistemas de água doce	Potencial de ecotoxicidade para sistemas dulçaquícolas	<b>PESD</b> (horizonte infinito) kg de 1,4-DCB eq.
<i>Ecotoxicidade para sistemas marinhos</i>	Emissão de substâncias tóxicas para sistemas marinhos	Potencial de ecotoxicidade para sistemas marinhos	<b>PESM</b> (horizonte infinito) kg de 1,4-DCB eq.

**Tabela 3.13 –** Categorias de impacto e respetivos indicadores e fatores de caracterização (cont.)

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Indicador de impacto</b>	<b>Fator de caracterização</b>	<b>Descrição do fator de caracterização</b>
<i>Ecotoxicidade para sistemas terrestres</i>	Emissão de substâncias tóxicas para sistemas terrestres	Potencial de ecotoxicidade para sistemas terrestres	<b>PEST</b> (horizonte infinito) kg de 1,4-DCB eq.

c. Classificação dos resultados do ICV

O procedimento de atribuição dos fluxos quantificados no ICV às categorias de impacto está predefinido no método CML. A classificação dos resultados do ICV inclui não só os fluxos da produção de cimento, como também os relativos à produção de energia primária e ao transporte de materiais e combustíveis. Na Tabela 3.14 constam apenas os fluxos específicos do processo de produção do cimento e as categorias às quais foram atribuídos de acordo com o método de impacto aplicado.

**Tabela 3.14 –** Classificação dos fluxos do ICV da produção de cimento

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Fluxos de entrada</b>	<b>Fluxos de saída</b>
<i>Depleção de recursos abióticos – Elementos</i>	-	-
<i>Depleção de recursos abióticos – Fósseis</i>	-	-
<i>Alterações climáticas</i>	-	CO <sub>2</sub> , fossil; CO <sub>2</sub> ; CO; CH <sub>4</sub>
<i>Depleção do ozono estratosférico</i>	-	-
<i>Acidificação</i>	-	NH <sub>3</sub> ; NO <sub>x</sub> ; SO <sub>2</sub>
<i>Eutrofização</i>	-	NH <sub>3</sub> ; NO <sub>x</sub>
<i>Formação de ozono troposférico</i>	-	CO; SO <sub>2</sub>
<i>Toxicidade humana</i>	-	NH <sub>3</sub> ; As; Cd; Cu; HCl; HF; Pb; Hg; Ni; NO <sub>x</sub> ; PM <sub>10</sub> ; SO <sub>2</sub> ; Ti; Zn
<i>Ecotoxicidade para sistemas dulçaquícolas</i>	-	As; Cd; Cu; HF; Pb; Hg; Ni; Ti; Zn
<i>Ecotoxicidade para sistemas marinhos</i>	-	
<i>Ecotoxicidade para sistemas terrestres</i>	-	

Tal como referido, o método CML não possui fatores de caracterização para todos os fluxos identificados, impedindo que estes sejam incluídos na avaliação de impacto. Esta limitação é mais evidente ao nível dos *inputs*. No que diz respeito ao indicador de depleção de recursos abióticos, o método CML considera que as reservas naturais de MPN, como o calcário e a argila, são infinitas. Consequentemente, não são considerados os efeitos da sua exploração. Dentre os vários fluxos de MPN associados à produção de cimento, apenas o carbonato de cálcio (equivalente da marga) consta dos fluxos que contribuem para a depleção de recursos abióticos. Relativamente à caracterização do impacto dos fluxos de saída, o CML é mais consistente. A todas as emissões atmosféricas quantificadas no ICV da produção de cimento foi possível atribuir um fluxo equivalente.

d. Caracterização dos indicadores de impacto

Os indicadores de impacto foram calculados com base nos dados do inventário adaptado e os fatores de caracterização definidos no método CML *baseline* (Universiteit Leiden, 2015). O método de cálculo é idêntico para os vários indicadores:

$$(6) \text{ Indicador} = \text{Fluxo} \times FC$$

Em que,

**Indicador** – Resultado do indicador de impacto (na unidade do fator de caracterização);

**Fluxo** – Quantidade do fluxo (na unidade do fluxo);

**FC** – Fator de caracterização do fluxo, específico à categoria de impacto (em unidade do fator de caracterização/unidade do fluxo).

A cada categoria de impacto é atribuído um fator de caracterização, através do qual é determinada a contribuição do fluxo para um determinado impacto. Os fatores de caracterização são atribuídos automaticamente de acordo com o definido no método de impacto.

e. Normalização dos resultados

O método de impacto CML *baseline* inclui *sets* de dados que permitem a normalização dos resultados dos indicadores. Neste trabalho, foi utilizado o *dataset* EU25+3 2000, relativas às emissões totais do ano 2000 nos países da União Europeia, incluindo a Islândia, a Noruega e a Suíça. A normalização é efetuada segundo a seguinte equação:

$$(7) \text{ Indicador}_N = \frac{\text{Indicador}}{FN}$$

Em que,

**Indicador<sub>N</sub>** – Resultado do indicador de impacto normalizado;

**Indicador** – Resultado do indicador de impacte (na unidade do fator de caracterização);

**FN** – Fator de normalização, específico à categoria de impacte (na unidade do fator de caracterização).

Os fatores de normalização para cada categoria de impacte (Tabela 3.15) são aplicados automaticamente pelo *software*.

**Tabela 3.15** – Fatores de normalização dos indicadores de impacte do *dataset* EU25+3 2000 (fonte: adaptado de Sleeswijk *et al.*, 2008)

Indicador de impacte	Fator de normalização
<i>PDRA-E</i> (em kg de antimónio eq.)	$6,0 \times 10^{10}$
<i>PDRA-F</i> (em MJ)	$3,5 \times 10^{22}$
<i>PAG</i> (em kg de CO <sub>2</sub> eq.)	$5,2 \times 10^{22}$
<i>PDCO</i> (em kg de CFC-11 eq.)	$1,0 \times 10^{17}$
<i>PA</i> (em kg de SO <sub>2</sub> eq.)	$1,7 \times 10^{20}$
<i>PE</i> (em kg de NO <sub>x</sub> eq.)	$1,9 \times 10^{20}$
<i>POF</i> (em kg de etileno eq.)	$1,7 \times 10^{19}$
<i>PTH</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	$5,0 \times 10^{21}$
<i>PESD</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	$2,1 \times 10^{21}$
<i>PESM</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	$4,4 \times 10^{23}$
<i>PEST</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	$1,2 \times 10^{21}$





## 4 Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados o ICV e a AICV do processo de produção do cimento na fábrica Secil-Outão. Em 4.1 são expostos os resultados do ICV, organizados por fluxos de entrada e fluxos de saída, e pelas subcategorias de cada conjunto de fluxos. São indicados os consumos e emissões dos cimentos I 42,5 e II 32,5 e é feita a comparação das exigências materiais e energéticas de cada um bem como dos efluentes que gera. Também são apresentados os resultados do inventário da produção de energia primária e dos processos de transporte. O subcapítulo 4.2 corresponde aos resultados da AICV. Com recurso ao *software* openLCA e com base no ICV desenvolvido, foram caracterizados os indicadores de impacto ambiental. É determinada a contribuição global dos processos de produção para o agravamento dos problemas ambientais representados pelos indicadores de impacto. Os resultados da aplicação do método de impacto CML *baseline* são apresentados por categoria de impacto e discriminados por tipo de cimento. É feita a comparação entre os resultados relativos ao cimento do tipo I e ao cimento do tipo II, que suporta a decisão sobre qual o produto com melhor desempenho ambiental.

### 4.1 Inventário do ciclo de vida

Os resultados apresentados correspondem ao ICV da produção dos cimentos I 42,5 e II 32,5. Em anexo são disponibilizados os inventários dos processos de produção dos cimentos I 42,5 e II 32,5 com os dados brutos recolhidos (Anexo I).

O consumo de matérias-primas é um dos fluxos com maior expressividade na produção de cimento. Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados do inventário relativos ao consumo de MPN e MPS na moagem de cru, para os cimentos do tipo I e II.

**Tabela 4.1** – Consumo de MPN (em kg/ton de cimento) na moagem de cru, por tipo de cimento

MPN	kg/ton de CEM I 42,5	kg/ton de CEM II 32,5
Calcário	657,1	470,1
Marga	784,0	560,9
Areia	97,1	69,4
Óxido de ferro	10,9	7,8
Gesso	8,3	5,9
<b>Total</b>	<b>1 557,4</b>	<b>1 114,1</b>

**Tabela 4.2 – Consumo de MPS (em kg/ton de cimento) na moagem de cru, por tipo de cimento**

<b>MPS</b>	<b>kg/ton de CEM I 42,5</b>	<b>kg/ton de CEM II 32,5</b>
<i>Substituição de marga</i>	31,98	22,81
<i>Substituição de areia</i>	0,05	0,04
<i>Substituição de óxido ferro</i>	10,65	7,62
<i>Substituição de gesso</i>	0,40	0,29
<i>Substituição de cru</i>	0,74	0,53
<b>Total</b>	<b>43,73</b>	<b>31,28</b>

Em ambos os casos verifica-se que o material mais consumido é a marga, um dos principais constituintes do clínquer a par do calcário. No geral, o consumo de MPN é superior no caso do cimento de categoria I, comparativamente ao de cimento de categoria II. Embora ambos os produtos sejam fabricados com o mesmo clínquer, a diferença é justificada tendo em conta que a quantidade de clínquer consumida na produção do cimento I 42,5, correspondente a 0,91 ton de clínquer/ton de cimento, é superior às 0,65 ton de clínquer consumidas na produção de 1 ton de cimento II 32,5. Tendo em conta a pesquisa bibliográfica desenvolvida, a intensidade de MPN na produção do cimento de categoria I, considerado o produto convencional, é superior ao valor médio indicado na literatura (Cembureau, 2013b). A crescente substituição da produção de cimento *Portland* convencional por cimentos compósitos contribui para a tendência decrescente da intensidade de MPN na produção de cimento, daí a discrepância dos valores relativos ao cimento I 42,5. Contudo, a quantidade de clínquer incorporado está abaixo do definido internacionalmente para os cimentos *Portland* (entre 0,95-1,00 ton de clínquer/ton de cimento). Relativamente ao cimento de categoria II, a intensidade de MPN é inferior à definida na literatura. Em termos da incorporação de clínquer, o cimento II 32,5 tem uma TIC inferior à média (Cembureau, 2013b) e encontra-se no limite mínimo definido para os cimentos do tipo II (CEN, 2004). Os resultados verificados em ambos os tipos de cimento são consequência da aposta da empresa na utilização de MPS em substituição da MPN, contribuindo para menores custos de produção e pressões ambientais. Relativamente ao consumo de MPS, verifica-se uma substituição de MPN por MPS superior à definida na literatura (Cembureau, 2013b). A maior parcela de MPS está associada à substituição da marga, a MPN com maior consumo. Tendo em conta a sua composição em clínquer, o cimento I 42,5 compreende um maior consumo de MPS.

Na fase final de produção de cimento ocorre o consumo de produtos minerais e de MPS. Nas Tabelas 4.3 e 4.4 constam, respetivamente, os resultados do inventário relativamente à adição de produtos minerais e de MPS como suplementos minerais.

**Tabela 4.3 – Consumo de produtos minerais (em kg/ton de cimento) na moagem de cimento, por tipo de cimento**

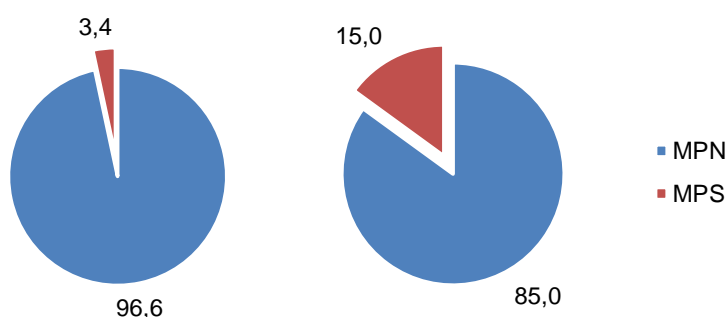
<b>Produtos minerais</b>	<b>kg/ton de CEM I 42,5</b>	<b>kg/ton de CEM II 32,5</b>
<i>Gesso</i>	49,5	51,8
<i>Calcário próprio</i>	10,7	69,2
<i>Calcário adquirido</i>	12,3	32,9
<b>Total</b>	<b>72,5</b>	<b>153,8</b>

**Tabela 4.4** – Consumo de MPS (em kg/ton de cimento) na moagem de cimento, por tipo de cimento

<b>MPS</b>	<b>kg/ton de CEM I 42,5</b>	<b>kg/ton de CEM II 32,5</b>
<i>Cinzas volantes</i>	12,2	3,3
<i>Filler</i>	1,4	188,5
<i>Pó de bypass</i>	0,0	0,5
<b>Total</b>	<b>13,6</b>	<b>192,3</b>

O cimento II 32,5 apresenta uma maior utilização de produtos minerais, o que é coerente com a composição dos cimentos *Portland* calcários. O consumo do gesso é transversal aos diferentes tipos de cimento. Ambos os produtos possuem cerca de 0,05 ton de gesso/ton de cimento, concordante com o estabelecido na NE (CEN, 2004). No que diz respeito ao consumo de calcário, este é um componente esperado na composição do cimento II 32,5. Contrariamente, na composição dos cimentos de categoria I não é comum a adição de suplementos minerais. Porém, a incorporação de calcário numa fase posterior à produção de clínquer compensa o teor em clínquer abaixo do considerado normal para os cimentos de categoria I. Por outro lado, são evitadas emissões de CO<sub>2</sub> resultantes da decarbonização do calcário. Como é esperado, sendo um cimento compósito, a produção de cimento II 32,5 apresenta um consumo de MPS significativamente superior ao da produção de cimento I 42,5, na qual apenas são adicionados dois dos três suplementos indicados. Contudo verifica-se que as cinzas volantes são uma exceção, dado que a sua adição é superior na produção do cimento *Portland* convencional. Semelhante ao concluído pela análise da Tabela 4.3, a adição de suplementos minerais na produção deste tipo de cimento tem como objetivo cumprir os requisitos da sua composição face a uma menor incorporação de clínquer.

Na Figura 4.1 é apresentada a composição em MPN e MPS dos cimentos I 42,5 e II 32,5, respetivamente.



**Figura 4.1** – Composição em MPN e MPS do CEM I 42,5 (à esquerda) e do CEM II 32,5 (à direita) (em %)

Com base nas figuras acima, em termos de matérias-primas, o cimento do tipo I é essencialmente composto por MPN, com uma reduzida parte relativa a MPS. O cimento do tipo II apresenta uma composição em MPS cerca de cinco vezes maior que a verificada no cimento I 42,5, e consequentemente, uma menor parcela de MPN. Pode aferir-se que a produção do cimento II 32,5 compreende uma intensidade de exploração de recursos naturais mais baixa.

O consumo energético no processo de produção do cimento divide-se entre o consumo de energia térmica e o de energia elétrica. Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados relativos ao consumo de energia térmica descrito pelo tipo de cimento e pela fonte de energia.

**Tabela 4.5 – Consumo de energia térmica (em MJ/ton de cimento), por tipo de cimento**

Energia térmica		MJ/ton de CEM I 42,5	MJ/ton de CEM II 32,5
Combustíveis fósseis	GPL	0,2	0,1
	Gasóleo	1,4	1,0
	Fuelóleo	12,5	8,9
	Coque de petróleo	2 067	1 479
Combustíveis alternativos	Plásticos e borrachas	385	278
	CDR	630	451
	RIP	175	125
	Biomassa vegetal	118	85
<b>Total</b>		<b>3 409</b>	<b>2 439</b>

O cimento com maior TIC, isto é, o CEM I 42,5, apresenta o consumo energético mais elevado. Contudo, ultrapassa o apurado na revisão bibliográfica (2 749 MJ/ton de cimento). Uma maior quantidade de clínquer na sua composição exige níveis de produção mais elevados, e consequentemente, um maior consumo de energia térmica. Em relação ao CEM II 32,5, o consumo de energia térmica total é inferior ao da literatura, coerente com uma TIC mais baixa. O principal efeito de um menor consumo de energia térmica corresponde à minimização dos níveis de emissões atmosféricas. O GPL e o gasóleo consumidos, respetivamente, nas caldeiras e nos trabalhos das pedreiras, têm a menor representatividade dentre os combustíveis consumidos. Os restantes consumos ocorrem na fase de cozedura do cru. O combustível mais utilizado é o coque de petróleo, seguido dos CDR. O fuelóleo é o combustível fóssil menos consumido, a par da biomassa vegetal na categoria dos combustíveis alternativos. Apesar de ter um PCI mais baixo comparativamente ao fuelóleo, o preço reduzido do coque de petróleo compensa a sua utilização. Em relação aos combustíveis de biomassa, possuem um PCI reduzido. A sua principal vantagem será a classificação das emissões de CO<sub>2</sub> associadas em CO<sub>2</sub> biogénico, que pode não ser contabilizado como uma contribuição da indústria para o agravamento das alterações climáticas (Villella & Arribas, 2013). Os resultados obtidos relativamente ao consumo de energia térmica por tipologia do combustível são coerentes com a literatura, que indicam o coque de petróleo como o combustível convencional mais utilizado e a biomassa vegetal como o combustível alternativo com menor procura. O conjunto de combustíveis utilizados distingue-se do padrão na medida em que não há consumo de carvão.

No que diz respeito à energia elétrica, o seu consumo ocorre ao longo de várias etapas do processo de produção. Os resultados associados ao fluxo de eletricidade são apresentados na Tabela 4.6. A produção de CEM I 42,5 exige um maior *input* de eletricidade, comparativamente à do CEM II 32,5.

**Tabela 4.6** – Consumo de energia elétrica (em kWh/ton de cimento) por tipo de cimento

<b>Energia elétrica</b>	<b>kWh/ton de CEM I 42,5</b>	<b>kWh/ton de CEM II 32,5</b>
<i>Britagem</i>	1,1	0,8
<i>Moagem de cru</i>	28,7	20,6
<i>Moagem de combustíveis</i>	2,9	2,1
<i>Cozedura do cru</i>	32,0	22,9
<i>Moagem de cimento</i>	51,0	35,0
<i>Expedição</i>	7,1	2,6
<b>Total</b>	<b>122,8</b>	<b>83,9</b>

O facto de possuir uma TIC mais alta e um maior consumo de energia elétrica nas fases de moagem de cimento e de expedição, justifica o valor apresentado. Na moagem do cimento, os materiais adicionados já apresentam uma granulometria idêntica ou próxima da desejada. Por outro lado, o clínquer ainda apresenta dimensões demasiado elevadas. Consequentemente, uma maior composição em clínquer exige um processo de moagem mais intenso e, por sua vez, um maior consumo de energia elétrica. Comparativamente à informação presente na literatura, o consumo na produção do cimento do tipo I encontra-se dentro dos limites (entre 90-150 kWh). A produção do cimento do tipo II apresenta um valor abaixo do limite mínimo, o que permite destacar o consumo de energia elétrica como uma das vantagens do cimento compósito.

O consumo de água é o fluxo de consumo de recursos naturais com menor expressão na produção do cimento, tendo em conta que todo o processo ocorre por via seca. Contudo, este recurso é utilizado para inúmeros serviços e processos acessórios à linha de produção, que asseguram o seu correto funcionamento. Na Tabela 4.7 é apresentado o consumo de água subterrânea, discriminado por tipo de cimento.

**Tabela 4.7** – Consumo de água subterrânea (em m<sup>3</sup>/ton de cimento) por tipo de cimento

<b>Água subterrânea</b>	<b>m<sup>3</sup>/ton de CEM I 42,5</b>	<b>m<sup>3</sup>/ton de CEM II 32,5</b>
<i>Perfuração e rebentamento</i>	0,04	0,03
<i>Britagem</i>	0,04	0,03
<i>Moagem de cru</i>	0,04	0,03
<i>Moagem de combustíveis</i>	0,04	0,03
<i>Cozedura do cru</i>	0,04	0,03
<i>Moagem de cimento</i>	0,06	0,06
<i>Expedição</i>	0,06	0,06
<b>Total</b>	<b>0,33</b>	<b>0,27</b>

Verifica-se que a produção do CEM I 42,5 compreende um consumo de água superior ao do CEM II 32,5. Tal como foi descrito no subcapítulo 3.2.2, o fluxo de água foi dividido igualmente pelos sete processos unitários do sistema de produto. Consequentemente, dado que maior parte do consumo ocorre nas etapas entre a perfuração e rebentamento e a cozedura do cru, quanto maior a quantidade de clínquer utilizada na produção do cimento, maior o consumo de água.

Os materiais de trabalho incluem as cargas explosivas utilizadas no desmonte de calcário e marga nas pedreiras e os materiais de empacotamento (sacos, paletes e *big bags*) utilizados na expedição do cimento. Os resultados do inventário referentes a estes produtos constam nas Tabelas 4.8 e 4.9.

**Tabela 4.8 – Consumo de cargas explosivas (em kg/ton de cimento) por tipo de cimento**

<b>Materiais de trabalho</b>	<b>kg/ton de CEM I 42,5</b>	<b>kg/ton de CEM II 32,5</b>
<i>Cargas explosivas</i>	0,18	0,13

**Tabela 4.9 – Consumo de materiais de empacotamento (em unidade) por tipo de cimento**

<b>Materiais de empacotamento</b>	<b>Unidade (CEM I 42,5)</b>	<b>Unidade (CEM II 32,5)</b>
<i>Sacos (pacotões + paletes)</i>	2 010 600	3 470 942
<i>Paletes de madeira</i>	0	35 434
<i>Big bags</i>	108 839	21 799

O consumo de explosivos por tipo de cimento foi calculado com base na TIC, o que justifica que o valor mais alto seja relativo ao cimento I 42,5. Por outro lado, um maior consumo de cargas explosivas pode ser indicativo de um maior consumo de MPN, o que é coerente com os resultados apresentados anteriormente. No que diz respeito aos materiais de empacotamento (Tabela 4.9), o CEM I 42,5 apenas foi expedido em pacotões e *big bags*, enquanto o CEM II 32,5 foi embalado também em paletes, daí o maior consumo de sacos. Os resultados referentes aos materiais de empacotamento não têm grande relevância no contexto do ICV dado que são específicos do ano de 2014 e variam diretamente com os níveis de produção. A sua variabilidade impede que estes dados sejam representativos do consumo padrão destes materiais.

A produção de cimento exige a aquisição de produtos minerais e combustíveis, pelo que o seu transporte é incluído no seu ICV. Na Tabela 4.10 são apresentadas as exigências da produção dos CEM I 42,5 e CEM II 32,5, ao nível do transporte de materiais e recursos.

**Tabela 4.10 – Transporte de produtos e combustíveis (em kg/ton de cimento) por tipo de cimento**

<b>Transporte</b>		<b>kg/ton de CEM I 42,5</b>	<b>kg/ton de CEM II 32,5</b>
<b>Rodoviário</b>	<i>Perfuração e rebentamento</i>	0,2	0,1
	<i>Moagem de cru</i>	158,3	133,3
	<i>Moagem de combustíveis</i>	59,8	42,7
	<i>Moagem de cimento</i>	86,2	346,1
<b>Marítimo</b>	<i>Moagem de combustíveis</i>	76,4	54,7
<b>Total</b>		<b>381</b>	<b>577</b>

A produção do CEM II 32,5 exige o transporte de uma maior quantidade de recursos, tendo em conta um consumo superior em produtos minerais e MPS na moagem de cimento. Relativamente às restantes fases do processo de produção, o CEM I 42,5 está associado ao transporte rodoviário de uma maior quantidade de recursos, pois a sua produção compreende um maior consumo de cargas explosivas, MPS na moagem de cru, combustíveis fósseis e combustíveis alternativos. A justificação do resultado

obtido para o transporte marítimo de combustíveis é idêntica, sendo que o cimento do tipo I está associado a um maior consumo de energia térmica.

Os principais fluxos de saída da produção de cimento dizem respeito a emissões atmosféricas, sendo o CO<sub>2</sub> o poluente com maior expressão. Relativamente aos dois tipos de cimento analisados, os resultados referentes à emissão de CO<sub>2</sub> são apresentados na Tabela 4.11.

**Tabela 4.11** – Emissão de CO<sub>2</sub> (em kg/ton de cimento) por tipo de cimento

Poluente atmosférico	Origem	kg/ton de CEM I 42,5	kg/ton de CEM II 32,5
CO <sub>2</sub>	<i>Combustíveis fósseis</i>	192	137
	<i>Combustíveis alternativos</i>	58,3	41,7
	<i>Descarbonização</i>	476	341
	<b>Total</b>	<b>727</b>	<b>520</b>

Os resultados apresentados acima para a emissão de CO<sub>2</sub> com origem no consumo de combustíveis fósseis incluem as emissões provenientes dos fornos de clínquer e das caldeiras. As emissões de CO<sub>2</sub> com origem em combustíveis alternativos e na descarbonização do calcário estão associadas apenas aos fornos de clínquer. Por comparação dos dois tipos de cimento, conclui-se que a produção do CEM I 42,5 é responsável por uma maior emissão global de CO<sub>2</sub>. Tendo em conta que o cimento do tipo I exige um maior fornecimento de energia térmica bem como uma maior quantidade de MPN, as emissões de CO<sub>2</sub> são consequentemente mais altas. Contudo, comparativamente ao indicado na literatura, as emissões totais de ambos os produtos estão abaixo dos valores médios das suas categorias (respetivamente, 900 e 740 kg de CO<sub>2</sub>/ton de cimento). Relativamente às emissões de CO<sub>2</sub> com origem fóssil, os resultados obtidos traduzem o benefício da substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos, e o não consumo de carvão. Em relação às emissões de CO<sub>2</sub> provenientes da descarbonização do calcário, enquanto o CEM II 32,5 apresenta um resultado abaixo do considerado na bibliografia, o CEM I 42,5 apresenta um valor superior. A composição elevada em MPN e em clínquer justificam o resultado.

A par do CO<sub>2</sub>, as partículas são um dos principais poluentes emitidos ao longo do processo de fabrico do cimento. Na Tabela 4.12 são apresentados os resultados do inventário relativos a este poluente.

**Tabela 4.12** – Emissão de partículas (em g/ton de cimento) por tipo de cimento

Poluente atmosférico	g/ton de CEM I 42,5	g/ton de CEM II 32,5
PM <sub>10</sub>	<i>Perfuração e rebentamento</i>	
	<i>Britagem</i>	5,1
	<i>Moagem de cru</i>	3,7
	<i>Moagem de combustíveis</i>	0,2
	<i>Cozedura do cru</i>	0,1
	<i>Moagem de cimento</i>	7,3
	<i>Expedição</i>	2,4
	<i>Total</i>	1,9
		6,7
	<b>27,3</b>	<b>22,1</b>

Os valores indicados na tabela acima incluem as emissões difusas e as emissões dos moinhos, dos fornos e das caldeiras. O *CEM I 42,5* apresenta a emissão de partículas mais alta nas várias fases do processo de produção. Apenas na etapa de moagem de cimento, o cimento do tipo II apresenta uma emissão de partículas ligeiramente superior. O consumo de mais produtos minerais e MPS nesta fase pode ser indicativo de uma maior libertação de partículas no decorrer da moagem. Comparativamente à literatura, os resultados obtidos estão enquadradas nos limites estabelecidos (entre 10 e 400 g/ton de cimento) e consideravelmente abaixo do limite superior. Este resultado decorre principalmente dos sistemas de filtração de partículas instalados nos moinhos e nos fornos.

Na Tabela 4.13 são apresentados os resultados do inventário relativos aos restantes fluxos de poluentes atmosféricos, produzidos durante a cozedura do cru.

**Tabela 4.13 – Emissão de poluentes atmosféricos (em g/ton de cimento) por tipo de cimento**

<b>Poluentes atmosféricos</b>	<b>g/ton de <i>CEM I 42,5</i></b>	<b>g/ton de <i>CEM II 32,5</i></b>
SO <sub>2</sub>	36,6	26,2
NO <sub>x</sub>	702	502
CO	860	615
HCl	2,2	1,6
HF	9,7x10 <sup>-2</sup>	6,9x10 <sup>-2</sup>
NH <sub>3</sub>	13,9	10,0
CH <sub>4</sub>	15,7	11,3
COVNM	15,7	11,3
Metais pesados (As+Cd+Cr+Cu+Hg+Ni+Pb+Zn+Ti)	7,3	5,2
PCDD+PCDF	2,3x10 <sup>-9</sup>	1,6x10 <sup>-9</sup>

Os resultados acima incluem as emissões dos fornos e das caldeiras. Devido à utilização de uma maior quantidade de clínquer na sua produção, o cimento do tipo I é responsável por maior fluxo de poluentes atmosféricos. A diferença entre os resultados dos dois tipos de cimento é mais evidente nas emissões de gases, sendo que as emissões de metais pesados e PCDD/PCDF são próximas. Dentre os poluentes constantes na Tabela 4.13, os NO<sub>x</sub> são os que apresentam um maior fluxo, seguido do CO. A incineração de combustíveis fósseis é a principal fonte destes poluentes. Por outro lado, as PCDD/PCDF, geralmente provenientes da MPN, são o poluente com menor expressão, o que é indicativo da qualidade das matérias-primas utilizadas. Comparativamente à literatura, os resultados obtidos são, no geral, mais baixos. As emissões de NH<sub>3</sub>, e metais pesados encontram-se acima dos valores indicados na revisão da literatura. O primeiro está presente na composição das MPN enquanto os metais pesados derivam dos combustíveis utilizados.

Os resíduos gerados identificados na produção de cimento apresentam diversas tipologias e origens. Na sua maioria, decorrem de processos de manutenção ou de obras na linha de produção. Os resultados do inventário relativos a este fluxo são apresentados detalhadamente no Anexo I. Na Tabela 4.14 são apresentados os resultados totais.



**Tabela 4.14 – Produção de RIB e RIP (em kg/ton de cimento), por tipo de cimento produzido**

Resíduos gerados		kg/ton de CEM I 42,5	kg/ton de CEM II 32,5
RIB	<i>Britagem</i>	0,01	0,01
	<i>Moagem de combustíveis</i>	0,01	0,01
	<i>Cozedura do cru</i>	0,51	0,36
	<i>Geral</i>	0,71	0,71
RIP	<i>Geral</i>	0,02	0,02
<b>Total</b>		<b>1,26</b>	<b>1,11</b>

De acordo com o procedimento de cálculo aplicado, descrito em 3.2.2, a associação dos resíduos aos processos unitários foi feita apenas nos casos em que a sua origem era inequívoca. Os casos particulares pertencem à categoria dos RIB (Tabela 3.3) e foram atribuídos aos processos de britagem e cozedura do cru. Consequentemente, é atribuída uma maior quota de produção de resíduos ao CEM I 42,5, por compreender um consumo de clínquer mais elevado.

Com recurso ao *software* openLCA, o inventário dos cimentos foi completado com a informação referente aos consumos e emissões dos processos de produção primária e de transporte. Estes processos exigem o consumo de uma grande variedade de materiais e recursos energéticos. Contudo, nem todos são relevantes no contexto do inventário da produção do cimento. São apenas apresentados os consumos energéticos da produção de energia primária e dos processos de transporte, e os *inputs* de materiais comuns entre o primeiro e a produção de cimento.

Relativamente à produção de energia primária, são apresentados os *inputs* de materiais comuns com a produção de cimento e os consumos energéticos (Tabelas 4.15 e 4.16, respetivamente).

**Tabela 4.15 – Consumo de MPN (em kg/ton de cimento) na produção de energia primária**

MPN	kg/ton de CEM I 42,5	kg/ton de CEM II 32,5
<i>Calcário</i>	56	38
<i>Areia</i>	0,7	0,5
<i>Gesso</i>	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$

**Tabela 4.16 – Consumo de combustíveis fósseis (em MJ/ton de cimento) na produção de energia primária**

Combustíveis fósseis	MJ/ton de CEM I 42,5	MJ/ton de CEM II 32,5
<i>Gasóleo</i>	3,1	2,1
<i>Fuelóleo</i>	2,4	1,7
<i>Coque de petróleo</i>	150	100
<i>Petróleo bruto</i>	$2,9 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-4}$
<i>Carvão</i>	$2,6 \times 10^{-3}$	$1,8 \times 10^{-3}$

A análise conjunta das Tabelas 4.15 e 4.16 permite concluir que os *inputs* associados à produção da energia primária consumida no fabrico do cimento do tipo I são superiores aos do fabrico do cimento do tipo II. Dado que o CEM I 42,5 consome uma maior quantidade de energia, os consumos associados

à produção desta são também mais altos. Em relação às MPN, destaca-se o consumo de calcário, que costuma ser utilizado na produção de eletricidade como condutor elétrico. Relativamente aos combustíveis fósseis, o consumo de coque de petróleo destaca-se significativamente dos restantes.

Na Tabela 4.17 são apresentados os resultados relativos às emissões atmosféricas decorrentes da produção de energia primária.

**Tabela 4.17** – Emissões atmosféricas (em kg/ton de cimento) geradas pela produção de energia primária

Poluentes atmosféricos	kg/ton de CEM I 42,5	kg/ton de CEM II 32,5
CO <sub>2</sub>	7,1	4,8
PM <sub>10</sub>	9,0x10 <sup>-4</sup>	6,4x10 <sup>-4</sup>
SO <sub>2</sub>	1,0x10 <sup>-5</sup>	6,9x10 <sup>-6</sup>
NO <sub>x</sub>	1,8x10 <sup>-3</sup>	1,2x10 <sup>-3</sup>
CO	5,5x10 <sup>-7</sup>	3,8x10 <sup>-7</sup>
HCl	3,6x10 <sup>-3</sup>	2,4x10 <sup>-3</sup>
HF	0,5	0,3
NH <sub>3</sub>	1,7x10 <sup>-4</sup>	1,2x10 <sup>-4</sup>
CH <sub>4</sub>	3,1x10 <sup>-10</sup>	2,1x10 <sup>-10</sup>
COVNM	4,7x10 <sup>-3</sup>	3,2x10 <sup>-3</sup>
Hidrofluorcarbonetos (HFCs)	1,2x10 <sup>-4</sup>	8,5x10 <sup>-5</sup>
Clorofluorcarbonetos (CFCs)	7,3x10 <sup>-2</sup>	5,2x10 <sup>-2</sup>
Metais pesados (Ar+Cd+Cr+Cu+Hg+Pb+Ti+Zi)	8,2x10 <sup>-3</sup>	5,6x10 <sup>-3</sup>
PCDD+PCDF	9,6x10 <sup>-7</sup>	6,8x10 <sup>-7</sup>

Tendo em conta que a produção do CEM I 42,5 exige um maior consumo de energia primária, os níveis de emissões atmosféricas na produção desta são superiores em comparação com os resultados do CEM II 32,5. As emissões de CO<sub>2</sub> e HF destacam-se como as mais elevadas dentre os poluentes indicados e têm como principal fonte a queima de combustíveis fósseis.

No que diz respeito aos processos de transporte, na Tabela 4.18 são apresentados os consumos de combustíveis fósseis descriminados por combustível e tipo de cimento.

**Tabela 4.18** – Consumo de combustíveis fósseis (em MJ/ton de cimento) nas etapas de transporte

Combustíveis fósseis	MJ/ton de CEM I 42,5	MJ/ton de CEM II 32,5
Gasóleo	1,9x10 <sup>-2</sup>	3,6x10 <sup>-2</sup>
Fuelóleo	2,9x10 <sup>-3</sup>	2,0x10 <sup>-3</sup>

A produção do cimento do tipo II compreende um consumo mais elevado de MPS, transportadas das entidades de origem até à fábrica do Outão. Consequentemente, é consumida uma maior quantidade de combustível, daí o resultado obtido para o consumo de gasóleo. Por outro lado, a produção de CEM I 42,5 exige um maior consumo de combustíveis na etapa de cozedura de cru, transportados essencialmente por via marítima. Dado que o consumo de fuelóleo está associado ao transporte

marítimo de combustíveis, é expectável que a produção do cimento do tipo I compreenda um maior consumo deste combustível.

Na Tabela 4.19 são apresentados os resultados referentes aos efluentes atmosféricos resultantes do transporte de recursos materiais e energéticos para a fábrica do Outão.

**Tabela 4.19** – Emissões atmosféricas (em kg/ton de cimento) geradas nas etapas de transporte

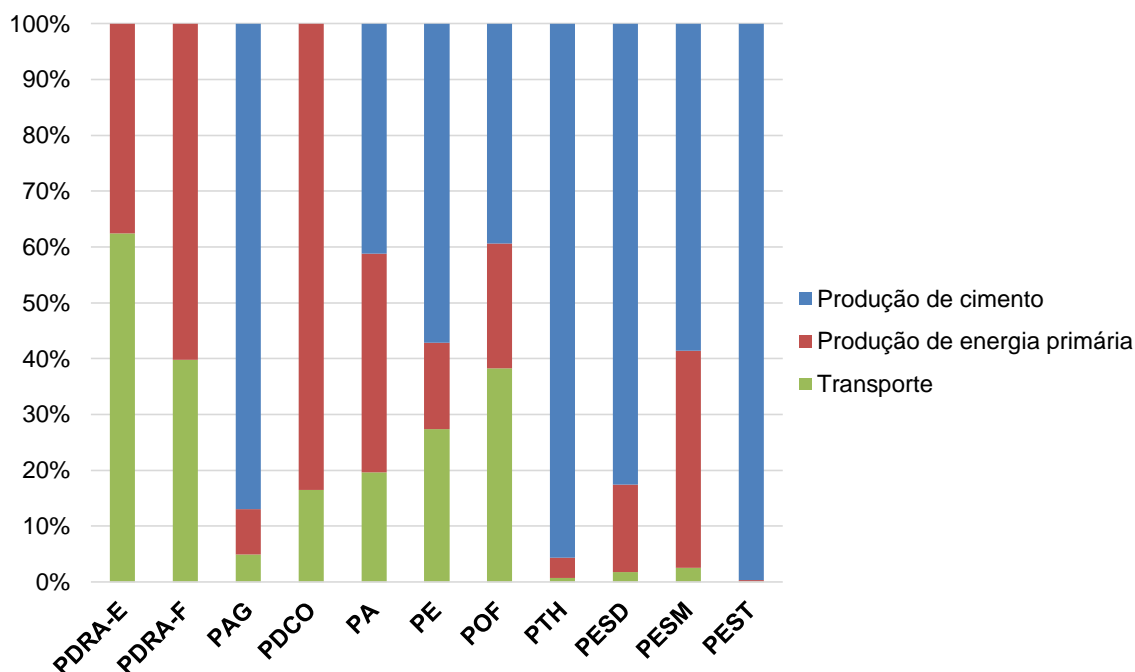
<b>Poluentes atmosféricos</b>	<b>kg/ton de CEM I 42,5</b>	<b>kg/ton de CEM II 32,5</b>
CO <sub>2</sub>	14	27
PM <sub>10</sub>	4,0x10 <sup>-2</sup>	2,9x10 <sup>-2</sup>
SO <sub>2</sub>	1,9x10 <sup>-3</sup>	2,0x10 <sup>-4</sup>
NO <sub>x</sub>	1,5x10 <sup>-2</sup>	2,4x10 <sup>-2</sup>
CO	2,5x10 <sup>-3</sup>	4,7x10 <sup>-3</sup>
HCl	2,2x10 <sup>-6</sup>	1,6x10 <sup>-6</sup>
HF	0,3	0,2
NH <sub>3</sub>	9,0x10 <sup>-2</sup>	1,6x10 <sup>-5</sup>
CH <sub>4</sub>	1,9x10 <sup>-5</sup>	3,2x10 <sup>-5</sup>
COVNM	8,2x10 <sup>-4</sup>	1,3x10 <sup>-3</sup>
HFCs	3,7x10 <sup>-3</sup>	2,6x10 <sup>-3</sup>
CFCs	33	23
Metais pesados (Ar+Cd+Cr+Cu+Hg+Pb+Ti+Zi)	1,4x10 <sup>-4</sup>	9,8x10 <sup>-5</sup>
PCDD+PCDF	4,0x10 <sup>-5</sup>	2,8x10 <sup>-5</sup>

Os dois tipos de cimento compreendem, com diferentes intensidades, o transporte de recursos por via rodoviária e por via marítima (Tabela 4.10). Por conseguinte, cada tipo de cimento apresenta as emissões mais elevadas em diferentes poluentes. Como a produção do CEM II 32,5 exige o transporte de uma maior quantidade de materiais, é responsável por emissões mais elevadas de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO e CH<sub>4</sub>. Dentre os poluentes indicados, o CO<sub>2</sub> apresenta o resultado mais elevado. A principal fonte deste GEE é a queima do combustível fóssil. Em relação aos restantes poluentes, o CEM I 42,5 apresenta os níveis de emissão mais altos. Destacam-se os CFCs cujo resultado é significativamente superior aos restantes. Este poluente, responsável pela depleção do ozono estratosférico, tem origem na queima do combustível.

## 4.2 Avaliação de impacto do ciclo de vida

Os resultados dos indicadores de impacto apresentados neste capítulo correspondem ao impacto global do processo principal e de cada processo secundário. Nos Anexos II e III são disponibilizados, respetivamente, os resultados descritos por etapa do processo de fabrico de cimento e por tipos de energia primária e de transporte.

Na Figura 4.3 é ilustrada a representatividade do processo de produção do cimento e dos processos secundários considerados, em cada um dos indicadores de impacto ambiental caracterizados; na Tabela 4.20 são apresentados os resultados correspondentes.



**Figura 4.2** – Contribuição do processo de produção principal e dos processos secundários (em %) no resultado dos indicadores de impacto ambiental

A Figura 4.3 foi construída com base na média dos resultados da AICV para os dois tipos de cimento analisados, pois em ambos os casos a representatividade dos processos secundários em cada indicador de impacto é idêntica. A produção do cimento é o processo que com maior frequência contribui significativamente para os impactos ambientais avaliados. Nos indicadores relacionados com a depleção de recursos abióticos (PDRA-E e PDRA-F), a produção do cimento não tem qualquer representatividade, dado que o método de impacto CML não atribui fatores de caracterização a nenhum dos fluxos ambientais identificados. No indicador de PDRA-E, o transporte é o processo com maior expressão (mais de 60%). A produção de energia primária, coerente com os processos que inclui, corresponde a cerca de 60% da depleção de recursos fósseis. Relativamente ao indicador de potencial de aquecimento global (PAG), a produção de cimento representa quase 90% dos fluxos ambientais associados à problemática das alterações climáticas. As emissões atmosféricas na etapa de cozedura de cru, especificamente a emissão de CO<sub>2</sub>, são um dos principais fluxos do sistema de produto e o seu impacto é representado no indicador PAG. A contribuição da produção de energia primária e do transporte é muito reduzida comparativamente à do processo de produção de cimento. O resultado obtido para o indicador relativo à depleção do ozono estratosférico (PDCO) decorre essencialmente da produção de energia primária. As emissões atmosféricas de halogéneos e CFCs resultantes da geração de eletricidade e da produção de fuelóleo e gasóleo correspondem aos fluxos ambientais considerados no cálculo deste indicador.

**Tabela 4.20** – Resultados da caracterização dos indicadores de impacto, descritos pelo sistema de produto principal e os sistemas secundários associados

Indicador de impacto	Produção de cimento	Produção de energia primária	Transporte
<i>PDRA-E</i> (em kg de antimônio eq.)	0,0	$1,2 \times 10^{-6}$	$2,1 \times 10^{-6}$
<i>PDRA-F</i> (em MJ)	0,0	715,6	48,0
<i>PAG</i> (em kg de CO <sub>2</sub> eq.)	625,2	56,8	36,5
<i>PDCO</i> (em kg de CFC-11 eq.)	0,0	$3,5 \times 10^{-7}$	$7,0 \times 10^{-8}$
<i>PA</i> (em kg de SO <sub>2</sub> eq.)	0,4	0,3	0,2
<i>PE</i> (em kg de NO <sub>x</sub> eq.)	0,1	$2,2 \times 10^{-2}$	$4,1 \times 10^{-2}$
<i>POF</i> (em kg de etileno eq.)	$2,2 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$
<i>PTH</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	163,3	5,8	1,3
<i>PESD</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	2,0	0,3	$3,9 \times 10^{-2}$
<i>PESM</i> (em ton de 1,4-DCB eq.)	14,9	9,2	0,6
<i>PEST</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	48	0,2	$1,7 \times 10^{-2}$
<b>Total</b> (em %)	<b>58,6</b>	<b>37,2</b>	<b>4,2</b>

O transporte também é responsável por emissões nocivas para a camada de ozono, contudo a sua representatividade não chega aos 20%. A produção do cimento não tem nenhum peso neste indicador. O problema ambiental da acidificação (indicador PA) tem como principais promotores a produção do cimento e a produção de energia primária, ambos responsáveis por cerca de 40% do resultado obtido. As emissões de NH<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub> (NO e NO<sub>2</sub>) e SO<sub>2</sub> identificadas em ambos os processos correspondem aos fluxos ambientais que promovem os fenômenos de acidificação incluídos nesta categoria de impacto. O transporte não tem um peso significativo neste impacto ambiental. No que diz respeito ao indicador relativo à eutrofização, mais de 50% dos fluxos ambientais que contribuem para a intensificação deste problema resultam da produção de cimento. As emissões de NO<sub>x</sub> provenientes da incineração de combustíveis fósseis e alternativos são os fluxos que mais contribuem para a eutrofização de massas de água. O mesmo fluxo ambiental representa o peso do transporte de materiais e combustíveis e da produção de energia primária, embora para o último não possua grande significância. No indicador de formação de ozono troposférico (POF), a produção de cimento e o transporte representam, respetivamente, 40% e 38% dos fluxos ambientais associados a este problema. As emissões de CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> provenientes de ambos os processos, e a libertação de hidrocarbonetos, no caso do transporte, são os poluentes responsáveis pelo agravamento da oxidação fotoquímica. O peso da produção de energia primária no resultado deste indicador não é muito significativo, contudo, também contribui com a emissão dos poluentes referidos. Relativamente aos indicadores de toxicidade e ecotoxicidade, a produção de cimento representa mais de 50% dos fluxos ambientais associados aos quatro indicadores. Nos indicadores de toxicidade para a saúde humana (PTH), de ecotoxicidade para sistemas dulçaquícolas, marinhos e terrestres (PESD, PESM e PEST, respetivamente), a produção de cimento apresenta resultados extremamente elevados, indicativo da perigosidade das suas emissões. A emissão de metais pesados é o fluxo com maior relevância nestas categorias de impacto, essencialmente devido ao seu carácter bioacumulador, e foi considerado elevado comparativamente ao valor presente na literatura (Tabela 4.13). A produção de energia primária possui maior relevância no

indicador de ecotoxicidade em sistemas marinhos, sendo que nos restantes indicadores, a par do transporte, os fluxos ambientais que representa não são relevantes comparativamente aos da produção de cimento.

Na Tabela 4.21 são apresentados os resultados da categoria de impacto de depleção de recursos abióticos, descritos por tipo de cimento.

**Tabela 4.21** – Resultados dos indicadores relativos à depleção de recursos abióticos por ton de cimento produzida

Indicador de impacto	CEM I 42,5	CEM II 32,5
PDRA-E (em kg de antimónio eq.)	$3,9 \times 10^{-6}$	$2,7 \times 10^{-6}$
PDRA-F (em MJ)	1 411	982

Os resultados obtidos demonstram que a produção do CEM I 42,5 exige uma maior exploração de recursos abióticos, o que é coerente com os resultados do ICV relativos ao consumo de MPN e combustíveis fósseis na produção deste tipo de cimento. O resultado do indicador PDRA-E está principalmente associado ao processo de transporte, contudo, o cimento do tipo II apresenta resultados inferiores aos do cimento do tipo I, contrariamente ao esperado (Tabela 4.10). A conversão dos fluxos do ICV à base de dados *ELCD* pode ser a causa dos resultados obtidos; na fase de cozedura do cru, na qual a equivalência entre processos de transporte diverge, o CEM I 42,5 exige o transporte de uma maior quantidade de recursos. Sendo que a produção do cimento do tipo I envolve o consumo de uma maior quantidade de recursos e combustíveis, é coerente relacionar o resultado obtido com este aspeto. Comparativamente ao CEM II 32,5, a diferença entre os resultados obtidos não é maior pois o cimento do tipo II envolve o consumo de uma maior quantidade de MPS, transportadas para as instalações da fábrica. A produção de cimento tem como base a extração de minerais, por isso seria de esperar que o seu impacto na disponibilidade de recursos abióticos fosse muito significativo. Porém, o método de cálculo aplicado não compreende os efeitos da exploração de minerais para a escassez de recursos abióticos. Esta questão já foi exposta em outras aplicações da ferramenta de ACV ao cimento (Chen *et al.*, 2010).

A emissão de CO<sub>2</sub> é a principal e mais significativa emissão atmosférica associada à produção de cimento. Como GEE, o CO<sub>2</sub> tem como principal efeito no ambiente o agravamento do aquecimento global e das alterações climáticas. Os resultados deste indicador para cada tipo de cimento são apresentados na Tabela 4.22.

**Tabela 4.22** – Resultados do indicador relativo às alterações climáticas e aquecimento global por ton de cimento produzida

Indicador de impacto	CEM I 42,5	CEM II 32,5
PAG (em kg de CO <sub>2</sub> eq.)	838	599

A incineração de combustíveis fósseis para produção de clínquer é a principal causa dos elevados níveis de emissões de CO<sub>2</sub>, o GEE com maior representatividade no indicador de PAG (aproximadamente 100% dos fluxos ambientais considerados). Dentre os produtos analisados, é o

cimento do tipo I que apresenta o resultado mais elevado. O consumo de uma maior quantidade de MPN resulta em emissões elevadas de CO<sub>2</sub> resultantes da descarbonização do calcário. Paralelamente, exige também um maior consumo de combustíveis fósseis e alternativos, cuja incineração é responsável pela emissão atmosférica de uma elevada quantidade de CO<sub>2</sub>. Por outro lado, quanto maior o consumo de combustíveis fósseis, maior a intensidade de produção e consequentemente decorrem mais emissões da produção de energia primária. Comparativamente à literatura consultada (Chen *et al.*, 2010; Boesch & Hellweg, 2010), os resultados obtidos para o CEM I 42,5, ainda que considerados elevados, podem ser enquadrados numa gama limitada pelos valores indicados na literatura. Relativamente ao cimento do tipo II, embora a literatura consultada diga respeito a cimentos do tipo I, o PAG obtido é inferior aos indicados, o que confirma que a produção do cimento compósito tem um peso menor no agravamento das alterações climáticas.

Na Tabela 4.23 são apresentados os resultados do indicador de impacte referente à depleção da camada de ozono estratosférico, discriminados por tipo de cimento.

**Tabela 4.23** – Resultados do indicador relativo à depleção da camada de ozono estratosférico por ton de cimento produzida

Indicador de impacte	CEM I 42,5	CEM II 32,5
PDCO (em kg de CFC-11 eq.)	4,9x10 <sup>-7</sup>	3,4x10 <sup>-7</sup>

Tal como foi referido na análise da Figura 4.3, a produção de cimento não contribui com a emissão de substâncias destruidoras da camada de ozono. Dentre os processos analisados, a produção de energia primária representa a principal fonte de substâncias destruidoras da camada de ozono; os CFCs correspondem a quase 100% dos fluxos ambientais associados ao indicador de PDCO. Consequentemente, dado que o CEM I 42,5 exige consumos superiores de energia elétrica e combustíveis fósseis, as emissões associadas à sua produção também serão mais altas. Contudo, os fluxos ambientais associados a esta categoria de impacte são emissões indiretas sobre as quais o produtor de cimento não tem controlo, aspeto que deve ter sido em conta na análise dos resultados deste indicador e no peso que lhe é atribuído. Comparativamente à bibliografia consultada, os resultados obtidos são mais baixos (Chen *et al.*, 2010). Em outros casos, tendo em conta que as emissões atmosféricas da produção do cimento não contribuem para a intensificação deste problema ambiental, o indicador não é incluído na avaliação de impacte (Van den Heede & De Belie, 2012).

A categoria de acidificação engloba os efeitos dos processos analisados na deterioração da qualidade dos sistemas naturais e infraestruturas humanas. Os resultados do indicador de impacte associado à acidificação são apresentados na Tabela 4.24.

**Tabela 4.24** – Resultados da avaliação do potencial de acidificação por ton de cimento produzida

Indicador de impacte	CEM I 42,5	CEM II 32,5
PA (em kg de SO <sub>2</sub> eq.)	1,0	0,7

Verifica-se que a produção do CEM I 42,5 tem um maior potencial de acidificação, comparativamente ao CEM II 32,5. A emissão de NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> correspondem em média a, respetivamente, 61% e 37% dos

resultados obtidos. Como a produção do cimento do tipo I exige um maior consumo de recursos materiais e energéticos, os níveis de emissão destes poluentes vão ser mais altos. O  $\text{NO}_x$  e  $\text{SO}_2$  resultam da produção dos combustíveis fósseis, da sua incineração juntamente com os combustíveis alternativos e do transporte dos materiais e combustíveis para a fábrica. Consequentemente, o *CEM I 42,5* tem um peso maior na intensificação da acidificação. O cimento do tipo II, ao estar associado a um consumo material e energético menos intenso, apresenta um PA mais baixo. Comparativamente à literatura, os resultados obtidos são mais baixos (Josa *et al.*, 2007). Deve ter-se em conta que a substituição dos combustíveis convencionais por alternativas mais sustentáveis contribui para uma menor carga ambiental do processo de produção relativamente a emissões de compostos de azoto e enxofre. Contudo, o resultado do indicador de impacto para o *CEM I 42,5* encontra-se próximo do valor associado ao seu tipo de cimento (1,1 kg de  $\text{SO}_2$  eq./ton de cimento). Quanto ao *CEM II 32,5*, o resultado obtido é mais baixo e a diferença em comparação com a literatura é mais significativa (1,5 kg de  $\text{SO}_2$  eq./ton de cimento).

Na Tabela 4.25 são apresentados os resultados referentes à contribuição da produção de cimento para a problemática da eutrofização.

**Tabela 4.25** – Resultados da avaliação do potencial de eutrofização por ton de cimento produzida

Indicador de impacto	<i>CEM I 42,5</i>	<i>CEM II 32,5</i>
PE (em kg de $\text{PO}_4$ eq.)	0,17	0,12

Através da comparação dos resultados de cada produto analisado, verifica-se que a produção do *CEM I 42,5* apresenta um maior potencial de eutrofização. No caso deste indicador, cerca de 94% do resultado obtido está relacionado com as emissões de  $\text{NO}_x$  (inclui  $\text{NO}$  e  $\text{NO}_2$ ). A emissão atmosférica deste poluente na produção do cimento do tipo I, apresenta níveis mais elevados, decorrentes de um maior consumo material e energético e de uma maior exigência sobre o processo de produção em geral. Em consequência, o *CEM I 42,5* é responsável por uma maior contribuição para o agravamento de problemas de eutrofização. Com base na comparação dos valores da Tabela 4.25 com os da literatura (Josa *et al.*, 2007), conclui-se que os resultados obtidos são superiores mas próximos dos indicados (0,14 kg de  $\text{PO}_4$  eq./ton de *CEM I* e 0,09 kg de  $\text{PO}_4$  eq./ton de *CEM II*). Contudo, deve ter-se em conta que em Josa *et al.* (2007) não são considerados processos para além da produção de cimento.

Os resultados da caracterização do indicador de formação de ozono troposférico são apresentados na Tabela 4.26.

**Tabela 4.26** - Resultados da avaliação do potencial de oxidação fotoquímica por ton de cimento produzida

Indicador de impacto	<i>CEM I 42,5</i>	<i>CEM II 32,5</i>
POF (em kg de etileno eq.)	$6,4 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-2}$

Através da análise da tabela acima, a produção do *CEM I 42,5* tem um maior peso no agravamento do fenómeno de oxidação fotoquímica. A emissão de  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$  e  $\text{NO}_x$  correspondem, a respetivamente,



42, 24 e 23% dos fluxos ambientais associados a esta problemática. A produção de efluentes de COVNM também contribui para a formação de ozono troposférico, porém a produção de cimento não apresenta uma emissão significativa deste poluente. De acordo com os resultados do ICV, entre o cimento do tipo I e o cimento do tipo II, o primeiro apresenta níveis de emissões mais altos relativamente aos poluentes CO, SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>. O consumo elevado de combustíveis, juntamente com a sua produção e transporte, justificam o resultado obtido para o *CEM I 42,5*. Deve ter-se em conta que a substituição dos combustíveis convencionais por combustíveis alternativos evita que a contribuição da produção de cimento para este fenómeno seja mais significativa. Comparativamente à literatura consultada (Chen *et al.*, 2010), os resultados obtidos são mais baixos, mas próximos do indicado (0,1 kg de etileno eq./ton de cimento).

Nas categorias relacionadas com a emissão de substâncias tóxicas, foi determinado o efeito da produção de cimento na saúde humana e nos sistemas de água doce, marinhos e terrestres. Na Tabela 4.27 são apresentados os resultados relativos à toxicidade para a saúde humana.

**Tabela 4.27** – Resultados da avaliação do potencial de toxicidade para a saúde humana por ton de cimento produzida

Indicador de impacto	<i>CEM I 42,5</i>	<i>CEM II 32,5</i>
PTH (em kg de 1,4-DCB eq.)	189	151

A produção do cimento do tipo I apresenta uma maior perigosidade para a saúde pública, comparativamente ao fabrico do cimento do tipo II. Os metais pesados são o fluxo ambiental com maior expressão nesta categoria de impacto correspondendo, em média, a 96% dos resultados obtidos. Tendo em conta que a emissão destes poluentes é superior na produção do *CEM I 42,5*, ao *CEM II 32,5* está associado um PTH inferior. A composição dos combustíveis utilizados e o seu consumo refletem-se diretamente nos níveis de emissão de metais pesados, o que justifica os resultados obtidos. Em relação aos resultados deste indicador na literatura (Chen *et al.*, 2010; Van den Heede & De Belie, 2012), os PTH obtidos são significativamente superiores. Os resultados do ICV relativos à emissão atmosférica de metais pesados foram considerados bastante acima dos valores presentes na literatura, o que justifica que o indicador de PTH possua valores elevados.

Os resultados relativos à ecotoxicidade para sistemas dulçaquícolas são apresentados na Tabela 4.28.

**Tabela 4.28** – Resultados da avaliação da ecotoxicidade para sistemas dulçaquícolas por ton de cimento produzida

Indicador de impacto	<i>CEM I 42,5</i>	<i>CEM II 32,5</i>
PESD (em kg de 1,4-DCB eq.)	2,55	2,04

Por análise da tabela acima, verifica-se que a produção do *CEM I 42,5* compreende um maior PESD. Em semelhança com os resultados do indicador de toxicidade para a saúde humana, a emissão de metais pesados são o fluxo ambiental com maior peso nesta categoria de impacto. O HF e as PCDD/DF também contribuem para a contaminação de sistemas de água doce. Com base na média entre os resultados de cada tipo de cimento, os metais pesados representam aproximadamente 97% dos fluxos

ambientais associados ao PESD. A diferença entre os níveis de emissão destes poluentes, essencialmente provenientes da queima de combustíveis fósseis e alternativos, justifica a diferença verificada entre os resultados dos dois produtos. Apesar da elevada emissão de metais pesados na produção de cimento, os resultados obtidos são inferiores aos presentes na literatura consultada (Chen *et al.*, 2010). Contudo, a produção de energia primária é indicada como o processo que mais contribui para este impacto ambiental, contrariamente ao que se verifica no gráfico da Figura 4.3.

Na Tabela 4.29 são indicados os resultados do indicador relativo à ecotoxicidade em sistemas marinhos.

**Tabela 4.29** - Resultados da avaliação da ecotoxicidade para sistemas marinhos por ton de cimento produzida

Indicador de impacto	CEM I 42,5	CEM II 32,5
PESM (em ton de 1,4-DCB eq.)	28,1	21,3

Verifica-se que o cimento I 42,5 apresenta um potencial de ecotoxicidade superior ao do cimento II 32,5. Das emissões caracterizadas na produção de cimento, os metais pesados e o HF são os principais contaminantes de sistemas marinhos. Relativamente ao resultado deste indicador, em média, aproximadamente 56% diz respeito à emissão de metais pesados e 42% à de HF. Os metais pesados apresentam uma representatividade significativa no indicador de ecotoxicidade de sistemas marinhos, coerente com a emissão elevada de metais pesados que se verificou nos resultados do ICV. Tendo em conta que o cimento do tipo II exige um menor consumo de combustíveis fósseis, logo uma menor produção destes, os níveis de emissão destes poluentes são mais baixos. Os resultados obtidos são inferiores aos presentes na literatura (Chen *et al.*, 2010) e, tal como no indicador de ecotoxicidade em sistemas de água doce, a produção de energia primária é indicada como o processo com maior representatividade nesta categoria de impacto.

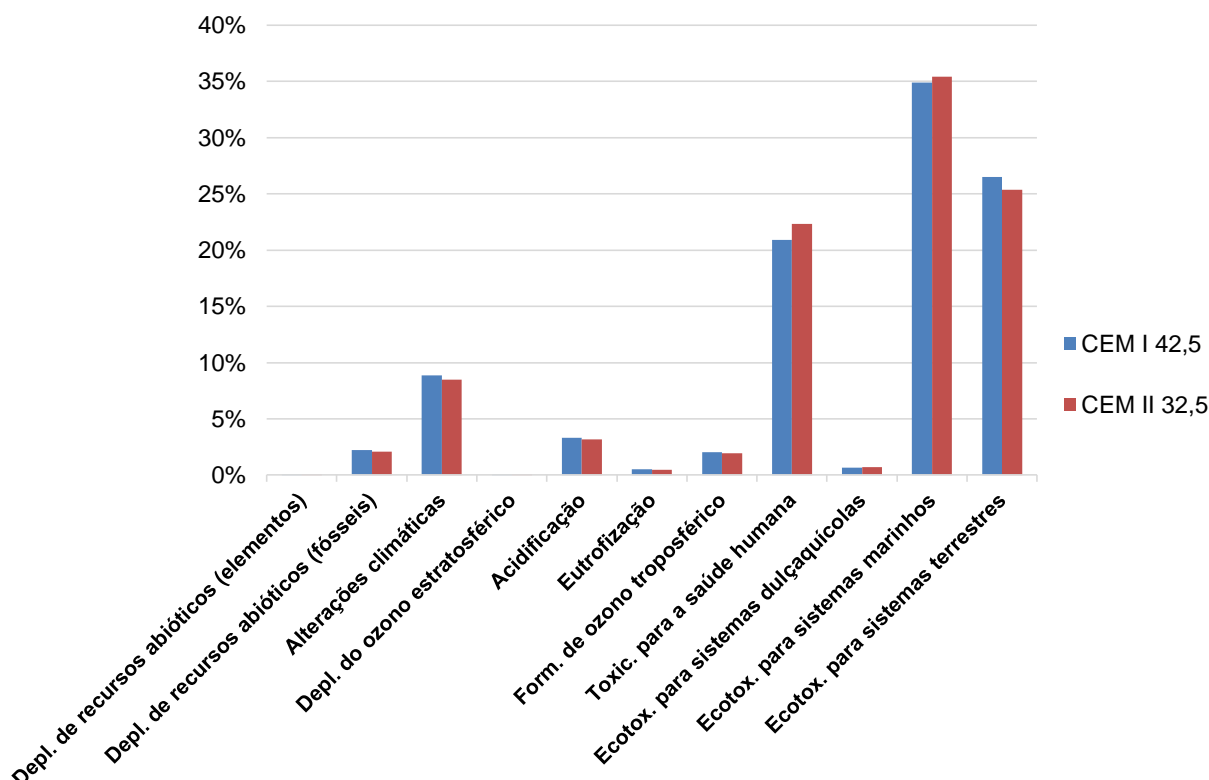
O resultado do indicador de impacto correspondente à ecotoxicidade em sistemas terrestres é apresentado na Tabela 4.30.

**Tabela 4.30** - Resultados da avaliação da ecotoxicidade para sistemas terrestres por ton de cimento produzida

Indicador de impacto	CEM I 42,5	CEM II 32,5
PEST (em kg de 1,4-DCB eq.)	55,8	39,9

De acordo com a tabela acima o cimento do tipo I apresenta o potencial de ecotoxicidade mais elevado. Neste indicador, o Hg representa, em média, cerca de 92% dos resultados obtidos. Em consequência de um maior consumo energético e, por sua vez, de uma maior produção de energia primária e transporte de combustíveis, a produção de CEM I 42,5 é responsável por uma maior emissão de Hg e outros metais pesados com efeitos nefastos nos sistemas terrestres. O CEM II 32,5, associado a emissões mais reduzidas, apresenta um potencial de ecotoxicidade inferior. Comparativamente à literatura (Chen *et al.*, 2010), os resultados do PEST são muito superiores (1,5 kg de 1,4-DCB eq./ton de cimento). A perigosidade das emissões da produção de cimento é suportada pelos resultados deste indicador de impacto.

Na Figura 4.3 é representado o peso de cada categoria de impacto no impacto global da produção dos *CEM I 42,5* e *CEM II 32,5*, calculado com base nos resultados normalizados dos respectivos indicadores.

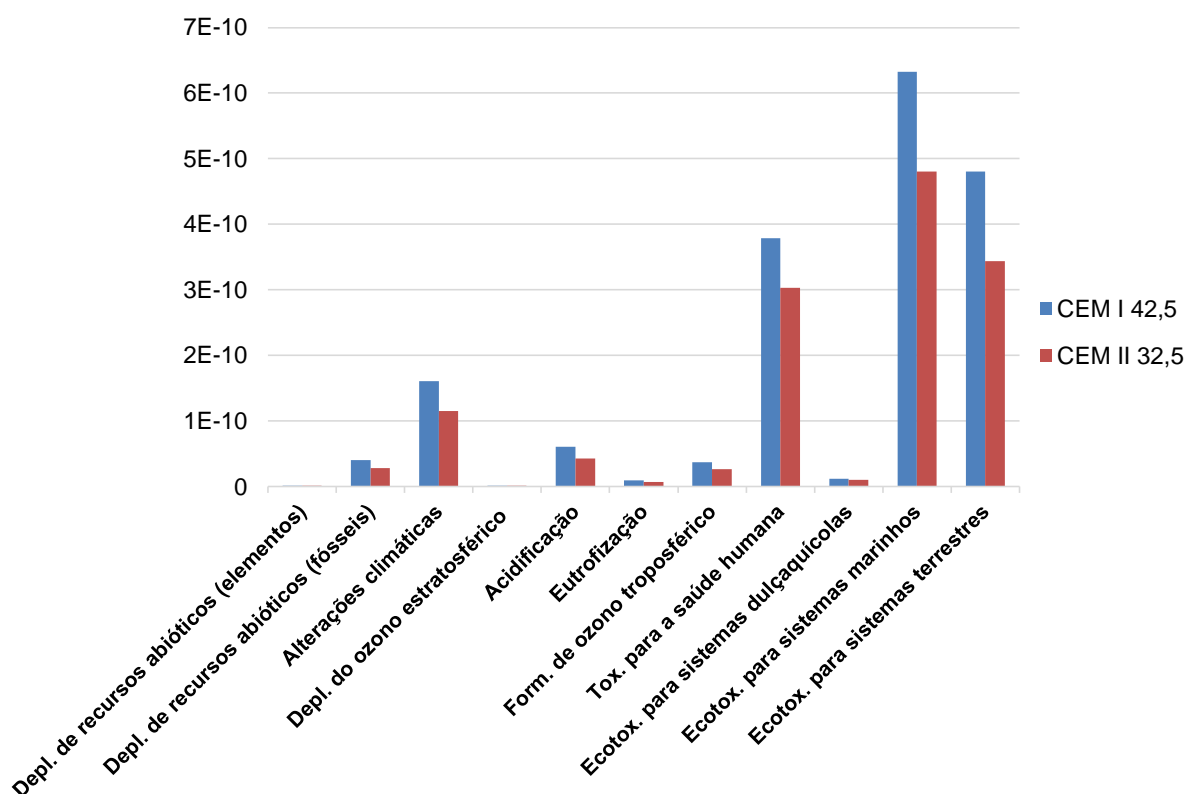


**Figura 4.3** – Significância relativa (em %) das categorias de impacto no impacto global da produção dos *CEM I 42,5* e *CEM II 32,5*

De acordo com a Figura 4.3, verifica-se que em ambos os casos, a ecotoxicidade para sistemas marinhos é o principal impacto ambiental da produção do cimento. Associado à emissão de metais pesados, este impacto destaca-se dos restantes com uma significância relativa de cerca de 35%, tanto no impacto global do cimento do tipo I como no do cimento do tipo II. Relativamente ao *CEM II 32,5*, o impacto de ecotoxicidade em sistemas marinhos tem um peso ligeiramente superior no impacto global. Em conjunto, as categorias de impacto relacionadas com os efeitos de toxicidade e ecotoxicidade da produção de cimento representam mais de 50% do impacto decorrente deste processo. Relativamente à ecotoxicidade para sistemas terrestres, na produção do *CEM I 42,5*, este impacto representa 27% do resultado global, enquanto na produção do *CEM II 32,5* corresponde a 25% do total. Apesar da diferença entre os resultados obtidos, em ambos os casos, esta categoria de impacto apresenta a segunda maior representatividade entre os impactos analisados. Também neste caso, a emissão de metais pesados é o fluxo ambiental com maior relevância. A toxicidade para a saúde humana compreende uma significância relativa de 21% no impacto ambiental do *CEM I 42,5*, e 22% no impacto do *CEM II 32,5*. As alterações climáticas também possuem alguma representatividade no impacto global da produção dos cimentos. Em relação ao cimento do tipo I, tem uma significância relativa de 9%, e quanto ao cimento do tipo II, uma significância relativa de 8%. Este resultado deriva diretamente das emissões de CO<sub>2</sub>, um dos principais fluxos ambientais da produção de cimento. O peso desta categoria de impacto é consideravelmente inferior ao das categorias de ecotoxicidade e toxicidade;

contudo destaca-se dos restantes impactes que apresentam significâncias inferiores a 4%. A acidificação corresponde a 3% do impacte global do processo de produção de ambos os cimentos, seguida da formação de ozono troposférico, com uma significância relativa de 2%, tanto no impacte ambiental do *CEM I* 42,5 como no impacte do *CEM II* 32,5. A depleção de recursos abióticos (elementos) e a depleção de ozono estratosférico têm a menor representatividade dentre os impactes avaliados. O primeiro possui uma significância relativa de 0,04%, na produção do *CEM I* 42,5, e de 0,03%, na produção do *CEM II* 32,5. A depleção da camada do ozono representa 0,003% e 0,002% do impacte global dos *CEM I* 42,5 e *CEM II* 32,5, respetivamente.

Na Figura 4.4 são representados os resultados normalizados de cada indicador de impacte com base nos fatores de normalização EU25+3 2000 (incluídos no método de impacte CML *baseline*); na Tabela 4.31 são apresentados os respetivos resultados.



**Figura 4.4** – Contribuição da produção de 1 ton de cimento do tipo I 42,5 e do tipo II 32,5 para o agravamento dos impactes ambientais analisados, com base nos resultados normalizados dos indicadores

Através da análise da Figura 4.4, conclui-se que o impacte ambiental da produção de 1 ton de *CEM I* 41,5 é superior ao impacte da produção da mesma quantidade de *CEM II* 32,5. Em todos os impactes ambientais avaliados, o cimento do tipo I compreende uma maior contribuição para a intensificação dos problemas ambientais associados. O resultado obtido decorre de um maior consumo material e energético que se traduz numa maior produção de efluentes de poluição diretos, associados ao fabrico do cimento, e indiretos, resultantes da produção de energia primária e dos processos de transporte.

**Tabela 4.31** – Resultados normalizados dos indicadores de impacto para a produção de 1 ton de *CEM I 42,5* e de *CEM II 32,5*

Indicador de impacto	<i>CEM I 42,5</i>	<i>CEM II 32,5</i>
<i>PDRA-E</i>	$6,5 \times 10^{-13}$	$4,6 \times 10^{-13}$
<i>PDRA-F</i>	$4,0 \times 10^{-11}$	$2,8 \times 10^{-11}$
<i>PAG</i>	$1,6 \times 10^{-10}$	$1,1 \times 10^{-10}$
<i>PDCO</i>	$4,8 \times 10^{-14}$	$3,3 \times 10^{-14}$
<i>PA</i>	$6,0 \times 10^{-11}$	$4,3 \times 10^{-11}$
<i>PE</i>	$9,1 \times 10^{-12}$	$6,6 \times 10^{-12}$
<i>POF</i>	$3,7 \times 10^{-11}$	$2,6 \times 10^{-11}$
<i>PTH</i>	$3,9 \times 10^{-10}$	$3,0 \times 10^{-10}$
<i>PESD</i>	$1,2 \times 10^{-11}$	$9,8 \times 10^{-12}$
<i>PESM</i>	$6,3 \times 10^{-10}$	$4,8 \times 10^{-10}$
<i>PEST</i>	$4,8 \times 10^{-10}$	$3,4 \times 10^{-10}$
<b>Total</b>	$1,8 \times 10^{-9}$	$1,4 \times 10^{-9}$

A diferença entre o impacto dos dois tipos de cimento é mais evidente nas categorias com maior representatividade no impacto global: *PESM*; *PEST*; *PTH*; e *PAG*. Através da normalização dos resultados dos indicadores de impacto, verifica-se que os problemas de ecotoxicidade em sistemas marinhos e sistemas terrestres, de toxicidade para a saúde humana e as alterações climáticas são os principais efeitos da produção de cimento. Traduzem a perigosidade das emissões atmosféricas geradas pelo processo, tanto para a saúde humana como do ambiente, e as consequências da intensidade energética do processo, relativamente às emissões elevadas de CO<sub>2</sub> e outros GEE. Os problemas ambientais relacionados com a acidificação, a depleção de recursos fósseis e a formação de ozono troposférico também são intensificados pela produção do cimento, ainda que com menor significância. Relativamente a estes indicadores de impacto, os efluentes atmosféricos gerados ao longo do processo de fabrico continuam a ser a principal pressão da indústria sobre os ecossistemas. Por outro lado, a produção de cimento apresenta um peso reduzido no agravamento de problemas de eutrofização, de depleção de elemento abióticos e da destruição do ozono estratosférico. No caso específico do processo de produção da Secil-Outão, o facto de não serem produzidos efluentes de águas residuais industriais evita a contribuição para a contaminação de massas de água. A depleção de elementos abióticos deveria ser um dos principais impactos da produção de cimento, tendo em conta que é uma indústria baseada na extração e transformação de MPN. Contudo, como já foi exposto, o método de caracterização aplicado não compreende os efeitos sobre reservas naturais de recursos abióticos. Relativamente à depleção da camada de ozono, o resultado obtido é justificado pela ausência de substâncias destruidoras de ozono nas emissões atmosféricas da produção de cimento.



## 5 Conclusões

O presente capítulo é organizado em duas partes: interpretação do ciclo de vida e recomendações para desenvolvimentos futuros. A componente 5.1 consiste na análise geral da elaboração do ICV e da AICV, tendo em conta a informação recolhida, a metodologia aplicada e a coerência com o objetivo do estudo. São também identificados os aspetos mais significativos de cada componente da ACV. Em 5.2 são apresentadas as conclusões retiradas dos resultados obtidos tendo em conta o objetivo do estudo realizado. Em 5.3 e 5.4 são apresentadas, respetivamente, as limitações encontradas no desenvolvimento do presente trabalho e recomendações e sugestões para estudos futuros para os quais o presente trabalho pode servir de ponto de partida ou fonte de informação.

### 5.1 Interpretação do ciclo de vida

O desenvolvimento da ACV do cimento pretendeu esclarecer sobre o desempenho ambiental de dois tipos de cimento com composições distintas e, por conseguinte, exigências materiais e energéticas também diferentes. Para tal, foi necessário identificar os fluxos de entrada e de saída, associados ao fabrico de cada tipo de cimento, e recolher a informação que permitisse elaborar a caracterização mais completa possível desse processo. Com base nos resultados dos fluxos ambientais, foi desenvolvida a avaliação do impacto ambiental dos processos de produção.

O ICV permitiu quantificar os fluxos ambientais associados aos processos de produção dos *CEM I 42,5* e *CEM II 32,5*, tanto ao nível das matérias-primas e da energia consumidas como das emissões atmosféricas e dos resíduos gerados. Apesar de não indicar explicitamente qual dos dois apresenta um melhor desempenho ambiental, os resultados desta componente da ACV compreende informação que permite prever o impacto ambiental dos processos de produção.

A informação utilizada na elaboração dos inventários dos dois tipos de cimento teve como principais fontes os documentos e registos da fábrica Secil-Outão. A única exceção corresponde aos dados relativos à distância percorrida no transporte dos combustíveis, obtidos com recurso à aplicação *GoogleEarth*, e aos inventários dos processos secundários de produção de energia primária e de transporte, obtidos através do *software* openLCA.

Tanto para o cimento do tipo I como para o cimento do tipo II, foi utilizada informação específica ao processo de produção do caso de estudo e sempre que possível discriminada por etapa. Nas etapas que precedem a moagem de cimento, associadas à produção de clínquer, foi desenvolvido um método de cálculo com base na TIC de cada cimento. Este procedimento permitiu diferenciar quantitativamente os principais consumos e emissões dos processos de produção dos cimentos em estudo e, assim, potenciar a representatividade dos resultados obtidos. Nas fases de moagem de cimento e de

expedição, o procedimento aplicado nas restantes etapas já não se adequava dado que o produto de referência não era o clínquer, mas sim o cimento final. Sempre que possível foram utilizados dados específicos ao tipo de cimento produzido, como o consumo de MPS, produtos minerais, materiais de empacotamento, energia elétrica e a emissão de partículas pelos moinhos de cimento.

Dentre os fluxos analisados, são identificados como mais significativos os seguintes: MPN; MPS; produtos minerais; combustíveis fósseis e alternativos; energia elétrica; e emissões atmosféricas. Os resultados dos fluxos enumerados permitiram diferenciar inequivocamente as exigências do processo de fabrico de cada tipo de cimento.

Apesar da sua relevância, o inventário não contribui com resultados específicos relativamente ao impacto ambiental do processo de produção, permitindo apenas prevê-lo de acordo com os consumos e emissões que lhe estão associados. A informação que compreende serviu de ponto de partida para a AICV, cujos resultados permitem determinar exatamente qual o cimento com uma menor pressão ambiental associada.

A componente de avaliação de impacto foi desenvolvida com recurso ao *software* openLCA em conjunto com a base de dados *ELCD* e o método de impacto CML *baseline*. Esta componente da ACV teve como base os resultados do ICV, adaptados aos padrões dos recursos digitais utilizados. Os procedimentos aplicados no processo de transposição dos resultados tiveram como principal finalidade preservar a variabilidade e representatividade dos fluxos quantificados na componente de inventário. A partir deste ponto já não houve interferência na construção da AICV; o cerne da avaliação de impacto, isto é, a atribuição dos fluxos a cada categoria de impacto e a definição dos fatores de caracterização, foi obtido automaticamente através da aplicação do método CML.

Na AICV foram avaliados onze categorias de impacto ambiental, dentre os quais destacam-se os seguintes: ecotoxicidade para sistemas marinhos; ecotoxicidade para sistemas terrestres; toxicidade para a saúde humana; e alterações climáticas. As categorias de impacto indicadas anteriormente são as que apresentam maior representatividade no impacto global da produção do cimento.

## 5.2 Principais conclusões

Tendo em conta os resultados do ICV, apresentados ao longo do subcapítulo 4.1, concluiu-se o seguinte:

- A produção do cimento I 42,5 exige um maior consumo de MPN e de energia (térmica e elétrica), enquanto a produção do cimento II 32,5 destaca-se com um maior consumo de MPS e produtos minerais, que se traduz diretamente num menor consumo de MPN.
- O fabrico do *CEM I* 42,5 compreende uma maior intensidade de efluentes atmosféricos decorrentes principalmente da etapa de cozedura do cru, devido à queima de grandes



quantidades de combustíveis fósseis e alternativos. As emissões atmosféricas associadas à produção da energia primária consumida também são mais elevadas em relação ao fabrico do cimento do tipo I.

- A produção do *CEM II 32,5*, globalmente, é responsável por níveis de emissões atmosféricas mais reduzidos. Contudo, por envolver o transporte de uma maior quantidade de materiais para a fábrica do Outão, as emissões atmosféricas decorrentes das etapas de transporte são mais altas relativamente a poluentes como o CO<sub>2</sub> e o CH<sub>4</sub>.
- O facto do cimento do tipo I ter uma maior composição em clínquer é a principal causa da intensidade de materiais, energia e efluentes que caracteriza o seu processo de fabrico. Ao cimento I 42,5, com uma TIC de 91,4%, é atribuída uma responsabilidade acrescida sobre a pressão ambiental da produção de clínquer.
- A TIC do cimento II 32,5 (65,4%), inferior à do cimento I 42,5, traduz um menor consumo de recursos naturais e energéticos, bem como emissões atmosféricas mais reduzidas. Consequentemente, a produção do cimento do tipo II exercerá uma menor pressão sobre o ambiente.

De acordo com os resultados do AICV, apresentados e discutidos em 4.2, foram conseguidas as seguintes conclusões:

- A produção do cimento I 42,5 tem um maior peso do que a produção do cimento II 32,5 no agravamento dos problemas ambientais analisados, dos quais se destacam a contribuição para a ecotoxicidade de sistemas naturais, a toxicidade humana e o aquecimento global.
- O impacto na produção de cimento na ecotoxicidade para sistemas marinhos e terrestres e na toxicidade para a saúde humana está associado à emissão de metais pesados. A produção do cimento I 42,5 está associada a uma emissão de metais pesados superior à da produção do cimento II 32,5. Consequentemente, apresenta uma maior contribuição para a intensificação dos problemas ambientais indicados.
- Em relação às alterações climáticas, o CO<sub>2</sub> é o principal potenciador destes fenómenos, e o fluxo ambiental da produção de cimento com maior relevância no âmbito desta categoria de impacto. A produção do cimento I 42,5 é responsável pela emissão de uma maior quantidade de CO<sub>2</sub> por ton produzida, comparativamente ao cimento II 32,5. Tendo em conta que contém uma maior quantidade de clínquer na sua composição, o cimento do tipo I está associado a um maior consumo de MPN e combustíveis, as principais fontes de CO<sub>2</sub>; as MPN devido à sua descarbonização e os combustíveis através da sua incineração.

Com base nos resultados obtidos da realização do ICV e da AICV, conclui-se que a produção do cimento I 42,5 exerce uma maior pressão sobre o ambiente, decorrente de um elevado consumo de recursos naturais e energéticos e da emissão significativa de substâncias tóxicas e de GEE, potenciadores das alterações climáticas. Comparativamente, a produção do cimento compósito *CEM II 32,5* apresenta um menor impacto ambiental em consequência de uma menor intensidade de materiais e energia; possui, assim, um melhor desempenho ambiental. Paralelamente aos benefícios ambientais

da produção do cimento do tipo II, este acarreta menores custos de produção tendo em conta um maior consumo de MPS em substituição de MPN e um menor consumo de energia.

Na produção do cimento compósito verifica-se uma relação *win-win* entre a indústria cimenteira e o ambiente. Ao considerar-se a indústria cimenteira como parte de uma rede industrial, identifica-se um terceiro elemento igualmente beneficiado pelas características dos cimentos compósitos. O sistema económico europeu encontra-se numa fase de transição entre a linearidade convencional dos processos industriais e económicos e uma nova abordagem que visa interligar estes processos por meio de princípios de reciclagem e recuperação de recursos. O processo de fabrico do cimento apresenta características que facilitam a implementação dos princípios da economia circular na indústria, melhor aproveitadas se o grosso da produção não for relativo ao cimento *Portland* convencional, mas a cimentos compósitos. Estes podem apresentar uma composição em MPS superior a 50%, pelo que o seu fabrico está predisposto para a nova realidade que a CE pretende implementar através da valorização material de resíduos e coprodutos.

### 5.3 Principais limitações

As limitações encontradas no desenvolvimento do presente estudo derivam parcialmente da especificidade da informação utilizada na elaboração dos ICV. A informação referente ao consumo de água, da emissão difusa de partículas e da produção de resíduos diz respeito a todo o processo de produção. Este facto impossibilitou a atribuição diferenciada dos fluxos a cada etapa do processo de produção. As suposições em que se basearam os procedimentos aplicados, tiveram como finalidade limitar efeitos na representatividade dos resultados finais. Contudo, em consequência do método aplicado, os fluxos indicados podem ter perdido significância, dado que não representam o consumo ou emissões reais de cada estágio do processo de produção. Ainda assim, foi possível distinguir os fluxos indicados entre os processos de fabrico dos cimentos I 42,5 e 32,5.

Foram também encontrados problemas no desenvolvimento da AICV, decorrentes da base de dados *ELCD* e do método de impacte CML *baseline*. A adaptação dos resultados do ICV aos fluxos existentes na base de dados traduziu-se no fator limitante da aplicação deste programa. A base de dados possui uma vasta coleção de fluxos elementares e de produtos, contudo o seu carácter gratuito prevê que fique aquém da realidade dos processos produtivos. Assim, a elaboração da avaliação de impacte implicou que fossem tidas em conta certas suposições que afetaram a variedade dos fluxos caracterizados no ICV. Os casos que mais se destacam são as cargas explosivas e os materiais de empacotamento. Pelo facto de não existirem equivalentes na *ELCD*, não foi possível incluí-los na avaliação de impacte.

Os problemas decorrentes da limitação da base de dados manifestaram-se também na construção do sistema de produto. Para além das várias fases da produção do cimento, foram incluídos os processos de produção de energia elétrica e combustíveis fósseis. A *ELCD* apenas compreende processos de produção para a eletricidade, o gasóleo e o fuelóleo. A produção de coque de petróleo, correspondente

ao combustível fóssil mais consumido no fabrico de cimento, e a produção de GPL, não foram incluídas na avaliação de impacto pois não constam da base de dados utilizada.

Relativamente ao método de impacto, os procedimentos de cálculo do CML *baseline* não são representativos da realidade da produção de cimento. O método CML considera que as reservas naturais de recursos abióticos são infinitas, logo, não são considerados os efeitos dos processos de produção sobre estas. Sendo a indústria cimenteira baseada na exploração de recursos naturais, mais especificamente, minerais, o seu impacto na diminuição das reservas destes recursos deveria ser extremamente significativa.

#### **5.4 Desenvolvimentos futuros**

Com a crescente atenção sobre o programa europeu para a implementação da economia circular, é realçado o papel de cada indústria na transformação e adaptação da estrutura económica do seu país a essa nova realidade. Como já foi referido, a indústria cimenteira compreende aspetos singulares que a predispõem para fazer parte de um sistema económico autossuficiente. Dada a atualidade do tema e a sua relevância, pode ser desenvolvido um estudo sobre o papel da indústria cimenteira na nova realidade do sistema económico europeu.

A reprodutibilidade de uma ACV depende diretamente da metodologia aplicada, mas também da informação disponível sobre o objeto de estudo. No presente trabalho a aplicação de uma análise *cradle-to-gate* foi de encontro aos procedimentos específicos da avaliação da processo de produção do cimento, indicados na literatura consultada, e abrangia as etapas sobre as quais existiam dados concretos. Contudo, é possível expandir os limites em que o estudo foi desenvolvido através da investigação do processo de produção de betão ou argamassa em Portugal. A aplicação da abordagem *cradle-to-grave* permitirá caracterizar as etapas de distribuição, utilização e fim-de-vida do cimento que apresentam uma elevada variabilidade de processos e fatores, e aferir sobre a pressão ambiental de cada uma.

O trabalho desenvolvido tinha como objetivo comprovar o desempenho ambiental superior de um tipo de cimento em relação a outro, com base no impacto ambiental da sua produção. Embora a presente dissertação cumpra os objetivos definidos, para um processo de decisão entre os dois produtos analisados, é necessário ter em conta outras dimensões que não a ambiental. Deve ser desenvolvida uma avaliação sobre o custo de cada produto e os seus aspetos técnicos, políticos e sociais. Este estudo em conjunto com o desenvolvido na presente dissertação compõem os elementos necessários para a tomada de uma decisão integrada e consciente das implicações da produção dos tipos de cimento analisados.



## 6 Referências

- Alcobia, B. A. (2009). *Desenvolvimento de um modelo conceptual para a Análise do Ciclo de Vida (ACV) de tecnologias de tratamento e valorização de óleos usados*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Amato, I. (2013). Concrete Solutions. *Nature*, pp. 300-301.
- Andrews, A., & Lattanzio, R. K. (2013). *Petroleum Coke: Industry and Environmental Issues*. Congressional Research Service.
- APA. (2014). *Licença Ambiental n.º 513/3.0/2014*. Agência Portuguesa do Ambiente.
- Benhelal, E., Rafiei, A., & Shamsaei, E. (2012). Green Cement Production: Potentials and Achievements. *International Journal of Chemical Engineering and Applications* 3, pp. 407-409.
- Bermudez, G. M., Moreno, M., Invernizzi, R., Plá, R., & Pignata, M. L. (2010). Heavy metal pollution in topsoils near a cement plant: The role of organic matter and distance to the source to predict total and HCl-extracted heavy metal concentrations. *Chemosphere* 78, pp. 375-381.
- Boesch, M. E., & Hellweg, S. (2010). Identifying improvement potentials in cement production with LCA. *Environ. Sci. Technol.* 11, pp. 9143-9149.
- Boston Consulting Group. (2013). *The Cement Sector: A strategic contributor to EU's future*.
- British Geological Survey. (2014). *Planning: Mineral Planning Factsheets*. Consultado em Junho de 2015 e disponível em <https://www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=1353>
- Brown, L. M., Hanafi, A., & Petsonk, A. (2008). *The EU Emissions Trading System: Results and Lessons Learned*. Environmental Defense Fund. Environmental Defense Fund.
- Canfa, W. (2007). Chinese Environmental Law Enforcement: Current deficiencies and suggested reforms. *Vermont Journal of Environmental Law*, pp. 159-193.
- Caruso, H. G. (2006). *Reduction of CO<sub>2</sub> Emissions from Cement Plants*. Masters Thesis, University of Waterloo.
- Cembureau. (1999). *Environmental Benefits of Using Alternative Fuels in Cement Production: A Life-Cycle Approach*. Cembureau. Obtido em Julho de 2015 em <http://www.wbcsdcement.org/pdf/tf2/CEMBUREAU.pdf>

Cembureau. (2012). *Activity Report 2012*. Cembureau. Obtido em Julho de 2015 em [http://www.cembureau.eu/sites/default/files/category\\_pictures/AR2012.pdf](http://www.cembureau.eu/sites/default/files/category_pictures/AR2012.pdf)

Cembureau. (2013a). *Activity Report 2013*. Activity Report: Cembureau. Obtido em Julho de 2015 em [http://www.cembureau.eu/sites/default/files/category\\_pictures/AR2013.pdf](http://www.cembureau.eu/sites/default/files/category_pictures/AR2013.pdf)

Cembureau. (2013b). *The role of cement in the 2050 low carbon economy*. Cembureau. Obtido em Julho de 2015 em <http://www.cement.ie/brochure/cembureau-brochure.pdf>

Cembureau. (2013c). *Cements for a low-carbon Europe*. Cembureau. Obtido em Julho de 2015 em <http://www.cembureau.be/sites/default/files/documents/Cement%20for%20low-carbon%20Europe%20through%20clinker%20substitution.pdf>

Cembureau. (2014). *Activity Report 2014*. Cembureau. Obtido em Julho de 2015 em [http://www.cembureau.eu/sites/default/files/Activity%20Report%202014\\_website\\_1.pdf](http://www.cembureau.eu/sites/default/files/Activity%20Report%202014_website_1.pdf)

Cembureau. (2015). How can the cement industry contribute to the EU recycling targets. *The Future of European Recycling Policy and the Circular Economy* (pp. 1-16). Bruxelas: Cembureau.

Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y., & Jullien, A. (2010). Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation. *Journal of Cleaner Production* 18, pp. 478-485.

Chen, L., Zuoren, N., Suping, C., Xianzheng, G., Zhigong, W., & Xiance, M. (2014). The life cycle inventory study of cement manufacture in China. *Journal of Cleaner Production* 72, pp. 204-211.

Cimpor. (2009). *Relatório & Contas 2009*. Cimpor. Obtido em Julho de 2015 em [http://www.cimpor.pt/listagem.aspx?caso=NOTICIAS&lang=pt&id\\_class=77&name=Relatorios-e-Publicacoes](http://www.cimpor.pt/listagem.aspx?caso=NOTICIAS&lang=pt&id_class=77&name=Relatorios-e-Publicacoes)

Cimpor. (2010). *Relatório & Contas 2010*. Cimpor. Obtido em Julho de 2015 em [http://www.cimpor.pt/listagem.aspx?caso=NOTICIAS&lang=pt&id\\_class=77&name=Relatorios-e-Publicacoes](http://www.cimpor.pt/listagem.aspx?caso=NOTICIAS&lang=pt&id_class=77&name=Relatorios-e-Publicacoes)

Cimpor. (2011). *Relatório & Contas 2011*. Cimpor. Obtido em Julho de 2015 em [http://www.cimpor.pt/listagem.aspx?caso=NOTICIAS&lang=pt&id\\_class=77&name=Relatorios-e-Publicacoes](http://www.cimpor.pt/listagem.aspx?caso=NOTICIAS&lang=pt&id_class=77&name=Relatorios-e-Publicacoes)

Cimpor. (2011). *Relatório de Sustentabilidade 2011*. Cimpor. Obtido em Julho de 2015 em [http://www.cimpor.pt/listagem.aspx?caso=NOTICIAS&lang=pt&id\\_class=77&name=Relatorios-e-Publicacoes](http://www.cimpor.pt/listagem.aspx?caso=NOTICIAS&lang=pt&id_class=77&name=Relatorios-e-Publicacoes)

Cimpor. (2012). *Relatório & Contas 2012*. Cimpor. Obtido em Julho de 2015 em [http://www.cimpor.pt/listagem.aspx?caso=NOTICIAS&lang=pt&id\\_class=77&name=Relatorios-e-Publicacoes](http://www.cimpor.pt/listagem.aspx?caso=NOTICIAS&lang=pt&id_class=77&name=Relatorios-e-Publicacoes)

Cimpor. (2013). *Relatório & Contas 2013*. Cimpor. Obtido em Julho de 2015 em [http://www.cimpor.pt/listagem.aspx?caso=NOTICIAS&lang=pt&id\\_class=77&name=Relatorios-e-Publicacoes](http://www.cimpor.pt/listagem.aspx?caso=NOTICIAS&lang=pt&id_class=77&name=Relatorios-e-Publicacoes)

Cimpor. (2014). *Relatório & Contas 2014*. Cimpor. Obtido em Julho de 2015 em [http://www.cimpor.pt/listagem.aspx?caso=NOTICIAS&lang=pt&id\\_class=77&name=Relatorios-e-Publicacoes](http://www.cimpor.pt/listagem.aspx?caso=NOTICIAS&lang=pt&id_class=77&name=Relatorios-e-Publicacoes)

CE. (2011a). *Roteiro de transição para uma economia hipocarbónica competitiva em 2050*. Comissão Europeia. Obtido em Julho de 2015 em <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52011DC0112&from=PT>

CE. (2011b). *Roteiro para uma Europa Eficiente na utilização de recursos*. Comissão Europeia. Obtido em Julho de 2015 em <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriS-erv.do?uri=COM:2011:0571:FIN:PT:PDF>

CE. (2014). *Para uma economia circular: programa para acabar com os resíduos na Europa*. Comissão Europeia. Obtido em Julho de 2015 em [http://eur-lex.europa.eu/legalcontent/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52014DC0398R\(01\)&from=PT](http://eur-lex.europa.eu/legalcontent/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52014DC0398R(01)&from=PT)

CSI. (2002). *The cement sustainability initiative: our agenda for action*. World Business Council for Sustainable Development. Obtido em Julho de 2015 em <http://www.wbcsdcement.org/documents/Agenda-for-Action.pdf>

CSI. (2014). *Guidelines for Co-Processing Fuels and Raw Materials in Cement Manufacturing*. Guide Book, World Business Council for Sustainable Development. Obtido em Julho de 2015 em <http://www.wbcsdcement.org/index.php/en/key-issues/fuels-materials/guidelines-for-selection>

Ding, G. (2014). Life Cycle Assessment (LCA) of sustainable building materials: an overview. Em F. Pacheco-Torgal, L. Cabeza, & J. Labrincha, *Eco-efficient construction and building materials* (pp. 38-58). Philadelphia: Woodhead Publishing.

ECRA. (2015a). *Blast furnace Cement (CEM III) EPD*. Environmental Cement Research Academy. Cembureau. Obtido em Julho de 2015 em <http://www.cembureau.be/sites/default/files/documents/CEMBUREAU%20%20EPD%20CEM%20III%20%20Feb%202015.pdf>

ECRA. (2015b). *Portland Cement (CEM I) EPD*. European Cement Research Institution. Cembureau. Obtido em Julho de 2015 em <http://www.cembureau.be/sites/default/files/6117%20-%20CEMBUREAU%20%20EPD%20CEM%20I%20Feb%202015.pdf>

ECRA. (2015c). *Portland-composite Cement (CEM II) EPD*. European Cement Research Academy. Cembureau. Obtido em Julho de 2015 em [http://www.cembureau.be/sites/default/files/documents/CEM BUREAU%20%20EPD%20CEM%20II%20%20Feb%202015.pdf](http://www.cembureau.be/sites/default/files/documents/CEM%20BUREAU%20%20EPD%20CEM%20II%20%20Feb%202015.pdf)

Edwards, C., & Fry, J. M. (2011). *Life cycle assessment of supermarket carrier bags: a review of the bags available in 2006*. United Kingdom Environment Agency.

EMEP/EEA. (2013). *Air pollutant emission inventory guidebook 2013*. European Environmental Agency. Obtido em Julho de 2015 em <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013/#>

EPD International. (2015). *Product Category Rules (PCR)*. Consultado em Agosto de 2015 e disponível em <http://www.environdec.com/PCR/>

UK-EA. (2011). *Pollution inventory reporting - cement and lime guidance note*. United Kingdom Environment Agency. Obtido em Julho de 2015 em [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/296986/LIT\\_7673\\_c9317d.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/296986/LIT_7673_c9317d.pdf)

EC. (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: General guide for Life Cycle Assessment - Detailed Guidance*. Office of the European Union. Obtido em Julho de 2015 em [http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC48157/ilcd\\_handbook-general\\_guide\\_for\\_lca-detailed\\_guidance\\_12march2010\\_isbn\\_fin.pdf](http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC48157/ilcd_handbook-general_guide_for_lca-detailed_guidance_12march2010_isbn_fin.pdf)

EC. (2013). *BAT: Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide*. Best Available Techniques (BAT) Reference Document, Institute for Prospective Technological Studies; Sustainable Production and Consumption Unit; European IPCC Bureau. Obtido em Julho de 2015 em [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/CLM\\_Published\\_def.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/CLM_Published_def.pdf)

EC. (2014a). *Environment News: Environment for Europeans Articles*. Consultado em Julho de 2015 e disponível em [http://ec.europa.eu/environment/news/efe/articles/2014/08/article\\_20140806\\_01\\_pt.htm](http://ec.europa.eu/environment/news/efe/articles/2014/08/article_20140806_01_pt.htm)

EC. (2014b). *Trends in Global CO<sub>2</sub> Emissions*. EC, Joint Research Centre's Institute for Environment and Sustainability. European Commission. Obtido em Julho de 2015 em [http://edgar.jrc.ec.europa.eu/news\\_docs/jrc-2014-trends-in-global-co2-emissions-2014-report-93171.pdf](http://edgar.jrc.ec.europa.eu/news_docs/jrc-2014-trends-in-global-co2-emissions-2014-report-93171.pdf)

EC. (2015a). *Circular Economy Strategy Roadmap*. European Commission. Obtido em Julho de 2015 em [http://ec.europa.eu/smart-regulation/impact/planned\\_ia/docs/2015\\_env\\_065\\_env+\\_032\\_circular\\_economy\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/smart-regulation/impact/planned_ia/docs/2015_env_065_env+_032_circular_economy_en.pdf)

EC. (2015b). *Environment: Circular economy*. Consultado em Setembro de 2015 e disponível em [http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm)

EC. (2015c). *Climate Action: EU Action*. Consultado em Julho de 2015 e disponível em [http://ec.europa.eu/clima/policies/brief/eu/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/brief/eu/index_en.htm)



EC. (2015d). *Growth: Raw materials, metals, minerals and forest-based industries*. Consultado em Julho de 2015 e disponível em <https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/minventory/content/secondary-raw-materials>

CEN. (2004). *EN 197-1:2000*. European Committee for Standardization. Obtido em Julho de 2015 em [http://www.holcim.az/fileadmin/templates/AZ/images/Technical\\_Solutions/EN-197-1\\_en.pdf](http://www.holcim.az/fileadmin/templates/AZ/images/Technical_Solutions/EN-197-1_en.pdf)

EEA. (1997). *Life Cycle Assessment (LCA): a guide to approaches, experiences and information sources*. European Environment Agency. Obtido em Julho de 2015 em <http://www.eea.europa.eu/publications/GH-07-97-595-EN-C>

Feiz, R., Ammenberg, J., Baas, L., Eklund, M., Helgstrand, A., & Marshall, R. (2015). Improving the CO<sub>2</sub> performance of cement, part I: utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 98, 272-281.

Ferreira, J. V. (2004). *Análise do Ciclo de Vida dos Produtos*. Instituto Politécnico de Viseu. Obtido em Julho de 2015 em <http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/jvf/Gest%C3%A3o%20Ambiental%20-%20An%C3%A1lise%20de%20Ciclo%20de%20Vida.pdf>

Gäbel, K., & Tillman, A.-M. (2005). Simulating operational alternatives for future cement production. *Journal of Cleaner Production* 13, pp. 1246-1257.

GaBi. (2015). *Overview: What does it do?*. Consultado em Agosto de 2015 e disponível em <http://www.gabi-software.com/international/overview/what-does-it-do/>

García-Gusano, D., Garraín, D., Herrera, I., Cabal, H., & Lechón, Y. (2015). Life Cycle Assessment of applying CO<sub>2</sub> post-combustion capture to the Spanish cement production. *Journal of Cleaner Production* 104, pp. 328-338.

GreenDelta. (1 de Agosto de 2015). *Products: openLCA*. Obtido de openLCA: <http://www.openlca.org/openlca>

Greer, W. L., Dougherty, A., & Sweeney, D. M. (2000). Portland Cement. Em A. & Association, *Air Pollution Engineering Manual* (pp. 664-681). Wiley-Interscience.

Guinée, J. B., Gorée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., . . . Huijbregts, M. A. (2004). *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*. New York, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers.

Habert, G. (2014). Assessing the environmental impact of conventional and 'green' cement production. Em F. Pacheco-Torgal, L. F. Cabeza, J. Labrincha, & A. de Magalhães, *Eco-efficient construction and building materials* (pp. 199-229). Philadelphia: Woodhead Publishing.

Huntzinger, D. N., & Eatmon, T. D. (2008). A life-cycle assessment of portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production* 17, pp. 1-8.

IBU. (2012). *CEM IV / B(P)32,5 R EPD*. Institut Bauen und Umwelt. Çimsa Çimento. Obtido em Julho de 2015 em [http://bau-umwelt.de/download/CY39c9271cX142703509a0X10a2/EPD\\_CIM\\_2011111\\_E.pdf](http://bau-umwelt.de/download/CY39c9271cX142703509a0X10a2/EPD_CIM_2011111_E.pdf)

ICCA. (2013). *How to Know If and When its Time to Comission a Life Cycle Assessment: an executive guide*. International Council of Chemical Associations. Obtido em Julho de 2015 em <http://www.greenbuildingsolutions.org/Main-Menu/Resources/How-to-Know-If-and-When-Its-Time-to-Commission-a-Life-Cycle-Assessment.pdf>

IEA. (2009). *Cement Technology Roadmap 2009*. WBCSD. World Business Council for Sustainable Development. Obtido em Julho de 2015 em <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Cement.pdf>

IEA. (2010). *Cement Production*. Energy Technology Systems Analysis Programme. International Energy Agency. Obtido em Julho de 2015 em [http://www.etsap.org/E-techDS/PDF/I03\\_cement\\_June%202010\\_GS-gct.pdf](http://www.etsap.org/E-techDS/PDF/I03_cement_June%202010_GS-gct.pdf)

Imbabi, M. S., Carrigan, C., & McKenna, S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment* 1, pp. 194-216.

IFC. (2007). *Environmental, Health, and Safety Guidelines for Cement and Lime Manufacturing*. World Bank Group. Obtido em Julho de 2015 em <http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/f74848804951d04eb75cb719583b6d16/Final+-+Cement+ and+Lime+Manufacturing.pdf?MOD=AJPERES>

ISO. (2009). *Environmental management: The ISO 14000 family of International Standards*. International Standard Organization. Obtido em Julho de 2015 em [http://www.iso.org/iso/theiso14000family\\_2009.pdf](http://www.iso.org/iso/theiso14000family_2009.pdf)

ISO. (2006a). *ISO 14040:2006: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. International Standard Organization.

ISO. (2006b). *ISO 14044:2006 - Environmental management - Life cycle assessment – Requirements and guidelines*. International Standard Organization.

ISO. (2015). *Standards: Life cycle assessment*. Consultado em Julho de 2015 e disponível em <http://www.iso.org/iso/home/search.htm?qt=life+cycle+assessment&sort=rel&type=simple&published=on>

Josa, A., Aguado, A., Cardim, A., & Byars, E. (2007). Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU. *Cement and Concrete Research* 37, 781-788.

Kim, S. G. (2010). *Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement*. Master Thesis, Iowa State University.

Klöpffer, W. (2014). Introducing Life Cycle Assessment and its presentation in 'LCA Compendium'. Em W. Klöpffer, *Background and Future Prospects in Life Cycle Assessment* (pp. 1-38). Frankfurt: Springer.

Lage, C. (2014). *Análise do Ciclo de Vida: comparação entre livros impressos e livros digitais*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Madloul, N., Saidur, R., Hossain, M., & Rahim, N. (2011). A critical review on energy use and savings in the cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, pp. 2042-2060.

Marceau, M. L., Nisbet, M. A., & VanGeem, M. G. (2006). *Life Cycle Inventory of Portland Cement Manufacture*. Chicago: Portland Cement Association.

Mehta, P. K. (2001). Reducing the Environmental Impact of Concrete. *Concrete International*, pp. 61-66.

Mishra, S., & Siddiqui, N. A. (2014). A Review on Environmental and Health Impacts of Cement Manufacturing Emissions. *International Journal of Geology, Agriculture and Environmental Sciences* 2, pp. 26-31.

Müller, C. (2012). Use of cement in concrete according to European standard EN 206-1. *HRBC Journal* 8, pp. 1-7.

Nascimento, L. (2014). *Benchmarking de desempenho e melhores práticas ambientais no setor cimenteiro - Caso de Estudo: Fábrica da Secil-Outão*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Navia, R., Rivela, B., Lorber, K., & Mendez, R. (2006). Recycling contaminated soil as alternative raw material in cement facilities: Life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling* 48, pp. 339-356.

Pacheco-Torgal, F., Cabeza, L., & Labrincha, J. (2014). *Eco-efficient construction and building materials*. Kråkerøy: Woodhead Publishing.

Papadakis, G. (2006). *Life Cycle Assessment (LCA) Brochure*. Technical University of Crete, Department of Production Engineering and Management. European Commission. Obtido em Julho de 2015 em [http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n\\_proj\\_id=2743](http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=2743)

Parkes, O., Lettieri, P., & Bogle, I. (2015). Life cycle assessment of integrated waste management systems for alternative legacy scenarios of the London Olympic Park. *Waste Management* 40, pp. 157-166.

Potgieter, J. H. (2012). An Overview of Cement production: How "green" and sustainable is the industry? *Environmental Management and Sustainable Development* 1, 14-37.

Rashid, A. F., & Yusoff, S. (2015). A review of life cycle assessment method for building industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45, 44-48.

Rome, A. (2003). "Give Earth a Chance": The Environmental Movement and the Sixties. *The Journal of American History* 90, 525-527.

Rønning, A., & Brekken, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) of the building sector: strenghts and weaknesses. Em F. Pachego-Torgal, L. Cabeza, & J. Labrincha, *Eco-efficient construction and building materials* (pp. 63-81). Kråkerøy: Woodhead Publishing.

Secil. (2004). *Processo de Fabrico de Cimento*. Secil - Companhia Geral de Cal e Cimento. Obtido em Agosto de 2015 em <http://www.secil.pt/pdf/Processo%20de%20Fabrico%20de%20Cimento.pdf>

Secil. (2006). *Declaração Ambiental da Fábrica SECIL-Outão 2002-2006*. Secil - Companhia Geral de Cal e Cimento. Obtido em Julho de 2015 em [http://www.secil.pt/pdf/outaoDA2002\\_2006.pdf](http://www.secil.pt/pdf/outaoDA2002_2006.pdf)

Secil (Realizador). (2008). *Processo de Fabrico de Cimento* [Filme].

Secil. (2010). *Relatório do Conselho de Administração 2010*. Secil - Companhia Geral de Cal e Cimento. Obtido em Julho de 2015 em [http://www.secil.pt/pdf/rc/rc\\_secil\\_2010.pdf](http://www.secil.pt/pdf/rc/rc_secil_2010.pdf)

Secil. (2011a). *Relatório do Conselho de Administração 2011*. Secil - Companhia Geral de Cal e Cimento. Obtido em Julho de 2015 em [http://www.secil.pt/pdf/rc/rc\\_secil\\_2011.pdf](http://www.secil.pt/pdf/rc/rc_secil_2011.pdf)

Secil. (2011b). *Declaração Ambiental da Fábrica SECIL-Outão 2011*. Secil - Companhia Geral de Cal e Cimento. Obtido em Julho de 2015 em <http://www.secil.pt/pdf/outaoDA2011.pdf>

Secil. (2012). *Relatório do Conselho de Administração 2012*. Secil - Companhia Geral de Cal e Cimento. Obtido em Julho de 2015 em [http://www.secil.pt/pdf/rc/rc\\_secil\\_2012.pdf](http://www.secil.pt/pdf/rc/rc_secil_2012.pdf)

Secil. (2013a). *Relatório do Conselho de Administração 2013*. Secil - Companhia Geral de Cal e Cimento. Obtido em Julho de 2015 em [http://www.secil.pt/pdf/rc/rc\\_secil\\_2013.pdf](http://www.secil.pt/pdf/rc/rc_secil_2013.pdf)

Secil. (2013b). *Declaração Ambiental da Fábrica SECIL-Outão 2013*. Secil - Companhia Geral de Cal e Cimento. Obtido em Julho de 2015 em <http://www.secil.pt/pdf/outaoDA2013.pdf>

Secil. (2013c). *Relatório EMAS da Fábrica SECIL-Outão 2013*. Secil - Companhia Geral de Cal e Cimento.

Secil. (2014a). *Relatório do Conselho de Administração 2014*. Secil - Companhia Geral de Cal e Cimento. Obtido em Julho de 2015 em [http://www.secil.pt/pdf/rc/rc\\_secil\\_2014.pdf](http://www.secil.pt/pdf/rc/rc_secil_2014.pdf)

Secil. (2014b). *Informação de Gestão "Portugal-Cimento" 2014*. Secil - Companhia Geral de Cal e Cimento. D

Secil. (2014c). *Relatório EMAS da Fábrica SECIL-Outão 2014*. Secil - Companhia Geral de Cal e Cimento.

Secil. (2014d). *Controlo dos combustíveis para monitorização do CO<sub>2</sub>*. Secil - Companhia Geral de Cal e Cimento.

Shen, L., Gao, T., Zhao, J., Wang, L., Wang, L., Liu, L., . . . Xue, J. (2014). Factory-level measurements on CO<sub>2</sub> emission factors of cement production in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 34, pp. 337-349.

Su, B., Heshmati, A., Geng, Y., & Yu, X. (2013). A review of the circular economy in China: moving from rhetoric to implementation. *Journal of Cleaner Production* 42, pp. 215-227.

The World Bank. (2015). *Data: Industry, value added (% of GDP)*. Consultado em Julho de 2015 em <http://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.TOTL.ZS>

Universiteit Leiden. (2015). *CML-IA Characterization Factors*. Disponível em <http://cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>

U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summary January 2015. *Mineral Commodity Summaries*, pp. 38-39. Obtido em Julho de 2015 em <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/mcs-2015-cemen.pdf>

USEPA. (2006). *Life cycle assessment: Principles and practice*. Ohio: U.S. Environmental Protection Agency. Obtido em Julho de 2015 em <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/mcs-2015-cemen.pdf>

Usón, A. A., López-Sabirón, A. M., Ferreira, G., & Sastresa, E. L. (2013). Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 23, pp. 242-260.

- Uwasu, M., Hara, K., & Yabar, H. (2014). World cement production and environmental implications. *Environmental Development* 10, pp. 36-47.
- Valderrama, C., Granados, R., Cortina, J. L., Gasol, C. M., Guillem, M., & Josa, A. (2012). Implementation of best available techniques in cement manufacturing: a life-cycle assessment study. *Journal of Cleaner Production* 25, pp. 60-67.
- Van den Heede, P., & De Belie, N. (2012). Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes: Literature review and theoretical calculations. *Cement & Concrete Composites* 34, pp. 431-442.
- van Oss, H. G. (2011). Reducing cement's CO2 footprint. *Cement, caught between ecological responsibility and economic imperatives*, pp. 12-15.
- van Oss, H. G., & Padovani, A. C. (2002). Cement Manufacture and the Environment Part I: Chemistry and Technology. *Journal of Industrial Ecology* 6, pp. 91-92.
- van Oss, H. G., & Padovani, A. C. (2003). Cement Manufacture and the Environment Part II: Environmental Challenges and Opportunities. *Journal of Industrial Ecology* 7, p. 95.
- Villella, M., & Arribas, C. (2013). *Cement, waste and carbon markets: Problems related to waste incineration in cement kilns under the EU ETS*. European Commission. Obtido em Setembro de 2015 em [http://www.gaiainlibrary.org/system/files/Cement%2C%20waste%20and%20climate%20change\\_Final.pdf](http://www.gaiainlibrary.org/system/files/Cement%2C%20waste%20and%20climate%20change_Final.pdf)
- Sleeswijk, A. W., Van Oers, L. F.C.M., Guinée, J.B., Struijs, J., & Huijbregts, M.A.J. (2008). Normalisation in product life cycle assessment: An LCA of the global and European economic systems in the year 2000. *Science of the Total Environment* 390, pp. 227-240.
- WBCSD-CSI. (2012). *The Cement Sustainability Initiative: 10 years of progress - Moving on to the next decade*. Progress Report, World Business Council for Sustainable Development, Cement Sustainability Initiative.
- WBCSD-CSI. (2015). *Key Issues: Climate protection*. Consultado em Setembro de 2015 e disponível em <http://www.wbcscement.org/index.php/en/key-issues/climate-protection>
- Weidema, B. (1999). System expansions to handle co-products of renewable materials. *Presentation Summaries of the 7th LCA Case Studies Symposium* (pp. 45-48). SETAC-Europe.
- Xie, S., Qi, L., & Zhou, D. (2004). Investigation of the effects of acid rain on the deterioration of cement concrete using accelerated tests established in laboratory. *Atmospheric Environment* 38, pp. 4457-4466.

## 7 Anexos

### Anexo I – Inventário dos cimentos I 42,5 e II 32,5 por processo unitário

#### 1. Perfuração e rebentamento

##### a. Fluxos de entrada

**Tabela 7.1 – Consumo de cargas explosivas (em ton)**

<b>Cargas explosivas</b>	<b>ton</b>
Emulsões (carga fundo + carga coluna)	306

**Tabela 7.2 – Consumo de água subterrânea (em m³)**

<b>Água</b>	<b>m³</b>
Água subterrânea	73 156

**Tabela 7.3 – Consumo de gasóleo (em ton e GJ)**

<b>Combustível</b>	<b>Atividade</b>	<b>ton</b>	<b>GJ</b>
Gasóleo	Perfuração e desmonte	54,2	2 333
	Trabalhos nas pedreiras	1,8	77
<b>Total</b>		<b>56,0</b>	<b>2 410</b>

##### b. Fluxos de saída

**Tabela 7.4 – Quantidade de MPN extraída das pedreiras (em ton)**

<b>Matérias-primas naturais</b>	<b>ton</b>
Calcário	1 113 489
Marga	1 328 468
<b>Total</b>	<b>2 441 957</b>

**Tabela 7.5 – Emissão de partículas (em kg)**

<b>Emissão de partículas</b>	<b>kg</b>
PM <sub>10</sub>	8 702

## 2. Britagem

### a. Fluxos de entrada

**Tabela 7.6 – Entrada de MPN no britador (em ton)**

<b>Matérias-primas naturais</b>	<b>ton</b>
Calcário	1 113 489
Marga	1 328 468
<b>Total</b>	<b>2 441 957</b>

**Tabela 7.7 – Consumo de água subterrânea (em m<sup>3</sup>)**

<b>Água</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
Água subterrânea	73 156

**Tabela 7.8 – Consumo de energia elétrica no britador (em kWh)**

<b>Energia elétrica</b>	<b>kWh</b>
Britador	1 836 970

### b. Fluxos de saída

**Tabela 7.9 – Quantidade de MPN britada (em ton)**

<b>Matérias-primas naturais</b>	<b>ton</b>
Calcário	1 113 489
Marga	1 328 468
<b>Total</b>	<b>2 441 957</b>

**Tabela 7.10 – Emissão de partículas (em kg)**

<b>Emissão de partículas</b>	<b>kg</b>
PM <sub>10</sub>	8 702

## 3. Moagem de cru

### a. Fluxos de entrada

**Tabela 7.11 – Entrada de MPN nos moinhos de cru (em ton)**

<b>Matérias-primas naturais</b>	<b>ton</b>
Calcário	1 113 489
Marga	1 328 468
Areia	164 494
Óxido de ferro	18 474
Gesso	13 986
<b>Total</b>	<b>2 441 957</b>



**Tabela 7.12 – Entrada de MPS nos moinhos de cru (em ton)**

<b>Matérias-primas secundárias</b>	<b>ton</b>
<b>Substituição de marga</b>	<b>54 022</b>
Gravilhas e fragmentos de rochas	90
Lamas de cal	2 891
Outros resíduos minerais não especificados	1 000
Resíduos de calcinação e hidratação de cal	11 580
Rejeitados de placas	3 521
Lamas de ETARI	4 088
Substâncias minerais	27
<b>Substituição de marga</b>	<b>54 022</b>
Outros resíduos incluindo mistura de materiais	11 382
Mistura de resíduos de cal	16 347
Resíduo granular cinzento	1 000
Mistura betão, tijolos e ladrilhos	1 227
Refratário usado (interno)	794
Outros revestimentos de fornos	75
<b>Substituição de areia</b>	<b>91</b>
Poeiras e pós	91
<b>Substituição de óxido de ferro</b>	<b>18 043</b>
Granalha usada	12
Granalha	18 031
<b>Substituição de cru</b>	<b>1 257</b>
Rejeitados de pó	1 257
<b>Substituição de gesso</b>	<b>680</b>
Resíduos cálcicos reacção sulfogesso	680
<b>Total</b>	<b>74 093</b>

**Tabela 7.13 – Consumo de água subterrânea (em m³)**

<b>Água</b>	<b>m³</b>
Água subterrânea	73 156

**Tabela 7.14 – Consumo de energia elétrica nos moinhos de cru (em kWh)**

<b>Energia elétrica</b>	<b>kWh</b>
Moinho de cru R1	19 964 891
Moinho de cru R2	28 748 785
<b>Total</b>	<b>48 713 676</b>

b. Fluxos de saída

**Tabela 7.15 – Produção de cru (em ton)**

<b>Cru</b>	<b>ton</b>
Moinho de cru R1	1 049 055
Moinho de cru R2	1 484 223
<b>Total</b>	<b>2 533 277</b>

**Tabela 7.16 – Emissão de partículas (em kg)**

<b>Emissão de partículas</b>	<b>kg</b>
PM <sub>10</sub>	8 702

**4. Moagem de combustíveis**

a. Fluxos de entrada

**Tabela 7.17 – Combustíveis alternativos triturados nos moinhos de carvão (em ton)**

<b>Combustíveis alternativos</b>	<b>ton</b>
Pneus Industriais	2 322
Pneus Inteiros	1 788
Pneus Maciços	3 884
Chips de Pneus	9 318
Telas de Borracha Triturada	5 604
Outros Plásticos e Borrachas	1 695
<b>Total</b>	<b>24 611</b>

**Tabela 7.18 – Consumo de água (em m<sup>3</sup>)**

<b>Água</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
Água subterrânea	73 156

**Tabela 7.19 – Consumo de energia elétrica nos moinhos de carvão (em kWh)**

<b>Energia elétrica</b>	<b>kWh</b>
Moinho de carvão K8	1 908 236
Moinho de carvão K9	3 026 058
<b>Total</b>	<b>4 934 294</b>

**Tabela 7.20 – Transporte rodoviário de combustíveis alternativos para a fábrica Secil-Outão**

<b>Resíduo</b>	<b>Origem</b>	<b>ton</b>	<b>km</b>	<b>ton.km</b>
<b>Plásticos e borrachas</b>		<b>20 320</b>	<b>63 039</b>	<b>454 725 148</b>
Pneus industriais	Ambitrena	274	633	173 065
Pneus industriais	Centro Rec Palmela	1 048	3 060	3 205 656
Pneus industriais	Transucatas	490	1 819	891 297
Pneus maciços	SGR	3 884	5 922	22 998 798

**Tabela 7.20 – Transporte rodoviário de combustíveis alternativos para a fábrica Secil-Outão (cont.)**

<b>Resíduo</b>	<b>Origem</b>	<b>ton</b>	<b>km</b>	<b>ton.km</b>
<b>Plásticos e borrachas</b>		<b>20 320</b>	<b>63 039</b>	<b>454 725 148</b>
Pneus inteiros	Signus	1 340	50 400	67 538 016
Pneus inteiros	Recogida Extremena	61	1 048	63 614
Pneus usados triturados	Signus	5 433	56 160	305 107 171
Chips de pneus	Recogida Extremena	25	262	6 461
Chips de pneus	TRN	675	15 727	10 615 860
Chips de pneus	RMD Sevilha	1 676	10 525	17 643 268
Resíduos industriais de borracha	Recipneu	1 157	305	352 611
Resíduos industriais de borracha	IT Comércio Internacional	1 616	9 412	15 205 839
Resíduos industriais de borracha	Biosafe	691	3 360	2 322 634
Resíduos de granulado de borracha	Ambigold	1 952	4 406	8 600 858
<b>Combustíveis derivados de resíduos</b>		<b>55 543</b>	<b>31 532</b>	<b>257 111 473</b>
RDF	Amarsul	5 019	1 902	9 545 256
RDF	Ambitrena	8 532	3 493	29 798 848
RDF	Citri	393	189	74 356
RDF	EGEO	764	785	599 807
RDF	SGR	21 043	7 403	155 770 956
RDF	TMB	8 925	1 168	10 426 512
RDF (fração fina)	Ambitrena	110	83	9 068
RDF (20 mm)	SGR	2 098	1 100	2 307 303
RDF	Renascimento	2 016	1 946	3 923 394
RDF	Valnor	5 956	7 160	42 642 096
RDF (bio secagem)	Valnor	384	1 253	481 302
Fluff	RMD Sevilha	303	5 052	1 532 575
<b>Resíduos industriais perigosos</b>		<b>12 522</b>	<b>28 607</b>	<b>62 272 483</b>
Lamas de tratamento físico-químico	Carmona	1 258	885	1 113 202
Lamas de tratamento físico-químico	Sisav	132	925	122 119
Resíduos líquidos aquosos	Ecodeal	1 788	10 284	18 387 873
Mistura de resíduos c/ substâncias perigosas	Ambitrena	338	385	130 276
Mistura de resíduos c/ substâncias perigosas	Carmona	5 266	2 117	11 148 394
Mistura de resíduos c/ substâncias perigosas	Metais Jaime Dias, SA	61	768	46 572
Mistura de resíduos c/ substâncias perigosas	Ecodeal	2 790	10 284	28 692 963
Mistura de resíduos c/ substâncias perigosas	Sisav	889	2 960	2 631 085
<b>Biomassa vegetal</b>		<b>12 348</b>	<b>10 648</b>	<b>130 453 178</b>
Resíduos de cortiça	Regina Cork	12 325	10 584	130 452 457
Tabaco	Polícia Judiciária	12	36	444
Tabaco	GNR	10	28	277

**Tabela 7.21** – Transporte marítimo de combustíveis alternativos para a fábrica Secil-Outão

Resíduo	Origem	ton
<b>Plásticos e borrachas</b>		<b>2 001</b>
Pneus industriais	Valor Ambiente	150
Pneus inteiros	<i>Ecological Waste</i>	301
Pneus usados triturados (mar)	Martinez cano Canarias	47
Pneus usados triturados (mar)	Geneus Canarias	855
Pneus usados triturados (mar)	Tacam	624
Chips de pneus	Valor Ambiente	24
<b>Combustíveis derivados de resíduos</b>		<b>19 488</b>
RDF	<i>MID UK Recycling Limited</i>	954
RDF	<i>N+P Alternative Fuel</i>	8 676
RDF	<i>Armstrong Environmental Services</i>	2 953
RDF	<i>Swindon Commercial Services</i>	964
RDF	<i>Neath Port Talbot Limited (STOBART)</i>	5 941

b. Fluxos de saída

**Tabela 7.22** – Quantidade de combustíveis alternativos triturados nos moinhos de carvão (em ton)

Combustíveis alternativos	ton
Plásticos e borrachas	24 611

**Tabela 7.23** – Emissão de partículas (em kg)

Emissão de partículas		kg
PM <sub>10</sub>	Moinho de carvão K8	24,9
	Moinho de carvão K9	298,3
<b>Total</b>		<b>323,2</b>

5. Cozedura do cru

a. Fluxos de entrada

**Tabela 7.24** – Entrada de cru nos fornos de clínquer (em ton)

Cru	ton
Forno de clínquer F8	1 049 055
Forno de clínquer F9	1 484 223
<b>Total</b>	<b>2 533 277</b>

**Tabela 7.25** – Consumo de água subterrânea (em m<sup>3</sup>)

Água	m <sup>3</sup>
Água subterrânea	73 156

**Tabela 7.26 – Consumo de combustíveis fósseis na cozedura do cru (em ton e GJ)**

<b>Combustíveis Fósseis</b>	<b>ton</b>	<b>GJ</b>
<b>Fuelóleo</b>	<b>525</b>	<b>21 139</b>
<b>Coque de petróleo</b>	<b>108 030</b>	<b>3 502 861</b>
<i>Ocean</i>	20 631	667 599
<i>Bologna</i>	22 736	748 532
<i>Bip Hill</i>	3 104	99 954
<i>Chang</i>	27 513	890 176
<i>Phoenix</i>	25 777	830 497
<i>Bremen</i>	6 234	199 509
<i>Wilson</i>	2 036	66 594
<b>Total</b>	<b>108 555</b>	<b>3 524 001</b>

**Tabela 7.27 – Consumo de combustíveis alternativos na cozedura do cru (em ton e GJ)**

<b>Combustíveis Fósseis</b>	<b>ton</b>	<b>GJ</b>
<b>Plásticos e borrachas</b>	<b>24 611</b>	<b>658 344</b>
Pneus Industriais	2 322	62 111
Pneus Inteiros	1 788	47 828
Pneus Maciços	3 884	103 887
Chips de Pneus	9 318	249 255
Telas de Borracha Triturada	5 604	149 919
Outros Plásticos e Borrachas	1 695	45 345
<b>Combustíveis derivados de resíduos</b>	<b>74 521</b>	<b>1 067 764</b>
RDF	74 218	1 058 955
Fluff	303	8 809
<b>Resíduos industriais perigosos</b>	<b>12 233</b>	<b>296 869</b>
Lamas de Trat. Físico-Químico	1 390	33 739
Resíduos Líquidos Aquosos	1 634	39 647
Mistura Resíduos c/ Subst. Perigosas	9 209	223 483
<b>Biomassa vegetal</b>	<b>12 348</b>	<b>200 241</b>
Resíduos de Cortiça	12 326	199 881
Tabaco	22	360
<b>Total</b>	<b>123 713</b>	<b>2 223 219</b>

**Tabela 7.28 – Consumo de energia elétrica na fase de cozedura de cru (em kWh)**

<b>Energia elétrica</b>	<b>kWh</b>
Forno de clínquer F8	21 676 643
Forno de clínquer F9	28 248 490
Consumo geral da fábrica (60%)	4 295 943
<b>Total</b>	<b>54 221 076</b>

b. Fluxos de saída

**Tabela 7.29 – Produção de clínquer (em ton)**

<b>Clínquer</b>	<b>ton</b>
Forno de clínquer F8	636 210
Forno de clínquer F9	912 256
<b>Total</b>	<b>1 548 466</b>

**Tabela 7.30 – Emissão de CO<sub>2</sub> pelos fornos de clínquer (em ton)**

<b>Emissão de CO<sub>2</sub></b>	<b>Combustíveis (ton)</b>	<b>Descarbonização (ton)</b>	<b>Total (ton)</b>
CO <sub>2</sub> (F8 + F9)	424 231	806 853	<b>1 231 084</b>

**Tabela 7.31 – Emissões atmosféricas provenientes dos fornos de clínquer (em kg)**

<b>Emissões atmosféricas</b>	<b>F8 (kg)</b>	<b>F9 (kg)</b>	<b>Total</b>
SO <sub>2</sub>	16 059	45 983	<b>62 043</b>
NO <sub>x</sub> (NO + NO <sub>2</sub> )	526 313	663 235	<b>1 189 547</b>
CO	798 187	659 400	<b>1 457 587</b>
HCl	1 272	2 428	<b>3 700</b>
HF	13	152	<b>164</b>
NH <sub>3</sub>	14 361	9 257	<b>23 618</b>
CH <sub>4</sub>	11 703	14 948	<b>26 651</b>
COVNM	11 703	14 948	<b>26 651</b>
PM <sub>10</sub>	13	5 645	<b>5 658</b>
<b>Metais pesados</b>	<b>5 821</b>	<b>6 524</b>	<b>12 344</b>
As	98	114	<b>212</b>
Cd	38	144	<b>182</b>
Cr	711	1 308	<b>2 019</b>
Cu	570	1 773	<b>2 344</b>
Hg	2 638	438	<b>3 076</b>
Ni	1 174	1 451	<b>2 624</b>
Pb	494	1 198	<b>1 691</b>
Zn	0	1	<b>1</b>
Ti	98	97	<b>195</b>
<b>Dioxinas/Furanos</b>	<b>2,6x10<sup>-6</sup></b>	<b>1,3x10<sup>-6</sup></b>	<b>3,9x10<sup>-6</sup></b>

**Tabela 7.32 – Emissões atmosféricas provenientes das caldeiras (em kg)**

<b>Emissões atmosféricas</b>	<b>Caldeira V81 (kg)</b>	<b>Caldeira V82 (kg)</b>	<b>Total</b>
CO <sub>2</sub>	16 731,0	913,0	<b>17 643,0</b>
NO <sub>x</sub> (NO+NO <sub>2</sub> )	19,0	1,0	<b>20,0</b>
CO	6,7	0,4	<b>7,0</b>
COT	1,0	5,6x10 <sup>-2</sup>	<b>1,1</b>
CH <sub>4</sub>	3,7x10 <sup>-1</sup>	2,0x10 <sup>-2</sup>	<b>3,9x10<sup>-1</sup></b>
Partículas	6,7x10 <sup>-1</sup>	3,6x10 <sup>-2</sup>	<b>7,0x10<sup>-1</sup></b>

**Tabela 7.33 – Emissões atmosféricas provenientes das caldeiras (em kg) (cont.)**

<b>Emissões atmosféricas</b>	<b>Caldeira V81 (kg)</b>	<b>Caldeira V82 (kg)</b>	<b>Total</b>
<b>Metais pesados</b>	$1,3 \times 10^{-1}$	$7,3 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-1}$
As	$4,4 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{-4}$	$4,6 \times 10^{-3}$
Cd	$2,5 \times 10^{-5}$	$1,4 \times 10^{-6}$	$2,6 \times 10^{-5}$
Cr	$1,4 \times 10^{-4}$	$7,5 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-4}$
Cu	$1,7 \times 10^{-4}$	$9,5 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^{-4}$
Hg	$1,1 \times 10^{-4}$	$5,8 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-4}$
Ni	$6,1 \times 10^{-5}$	$3,3 \times 10^{-6}$	$6,5 \times 10^{-5}$
Pb	$2,6 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-5}$	$2,8 \times 10^{-4}$
Ti	$3,6 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-4}$	$3,8 \times 10^{-3}$

## 6. Moagem do cimento I 42,5

### a. Fluxos de entrada

**Tabela 7.33 – Entrada de clínquer nos moinhos de cimento (em ton)**

<b>Clínquer</b>	<b>ton</b>
Moinho de cimento Z4	136 393
Moinho de cimento Z6	156 858
<b>Total</b>	<b>293 250</b>

**Tabela 7.34 – Consumo de produtos minerais na produção do cimento I 42,5 (em ton)**

<b>Produtos minerais</b>	<b>Z4 (ton)</b>	<b>Z6 (ton)</b>	<b>Total</b>
Gesso	7 434	8 446	<b>15 879</b>
Calcário próprio	1 756	1 688	<b>3 445</b>
Calcário adquirido	1 722	2 229	<b>3 951</b>

**Tabela 7.35 – Consumo de MPS na produção do cimento I 42,5 (em ton)**

<b>Matérias-primas secundárias</b>	<b>Z4 (ton)</b>	<b>Z6 (ton)</b>	<b>Total</b>
Cinzas	2 022	1 902	<b>3 924</b>
Filler	53	399	<b>452</b>

**Tabela 7.36 – Consumo de água subterrânea (em m³)**

<b>Água</b>	<b>m³</b>
Água subterrânea	73 156

**Tabela 7.37 – Consumo de energia elétrica pelos moinhos de cimento (em kWh)**

<b>Energia elétrica</b>	<b>kWh</b>
Moinhos de cimento Z4 + Z6	16 370 104

b. Fluxos de saída

**Tabela 7.38 – Produção de cimento I 42,5 (em ton)**

<b>Cimento I 42,5</b>	<b>ton</b>
Moinho de cimento Z4	149 379
Moinho de cimento Z6	171 521
<b>Total</b>	<b>320 900</b>

**Tabela 7.39 – Emissão de partículas (em kg)**

<b>Emissão de partículas</b>		<b>kg</b>
PM <sub>10</sub>	Moinho de Cimento Z4	6 546
	Moinho de Cimento Z6	1 236
<b>Total</b>		<b>7 782</b>

6. Moagem do cimento II 32,5

a. Fluxos de entrada

**Tabela 7.40 – Entrada de clínquer nos moinhos de cimento (em ton)**

<b>Clínquer</b>	<b>ton</b>
Moinho de cimento Z4	44 992
Moinho de cimento Z5	101 472
Moinho de cimento Z6	1 745
<b>Total</b>	<b>148.209</b>

**Tabela 7.41 – Consumo de produtos minerais na produção do cimento II 32,5 (em ton)**

<b>Produtos minerais</b>	<b>Z4 (ton)</b>	<b>Z5 (ton)</b>	<b>Z6 (ton)</b>	<b>Total</b>
Gesso	3 361	8 256	119	<b>11 736</b>
Calcário próprio	1 794	13 809	75	<b>15 679</b>
Calcário adquirido	3 469	3 847	139	<b>7 454</b>

**Tabela 7.42 – Consumo de MPS na produção do cimento II 32,5 (em ton)**

<b>Matérias-primas secundárias</b>	<b>Z4 (ton)</b>	<b>Z5 (ton)</b>	<b>Z6 (ton)</b>	<b>Total</b>
Cinzas	465	217	75	<b>758</b>
Filler	14 520	27 736	475	<b>42 732</b>
Pó de <i>bypass</i>	0	106	0	<b>106</b>

**Tabela 7.43 – Consumo de água subterrânea (em m<sup>3</sup>)**

<b>Água</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
Água subterrânea	73 156



**Tabela 7.44** – Consumo de energia elétrica pelos moinhos de cimento (em kWh)

Energia elétrica	kWh
Moinhos de cimento Z4 + Z5 + Z6	7 931 346

b. Fluxos de saída

**Tabela 7.45** – Produção de cimento II 32,5 (em ton)

Cimento II 32,5	ton
Moinho de cimento Z4	68 601
Moinho de cimento Z5	155 517
Moinho de cimento Z6	2 591
<b>Total</b>	<b>226 710</b>

**Tabela 7.46** – Emissão de partículas (em kg)

Emissão de partículas		kg
PM <sub>10</sub>	Moinho de cimento Z4	6 546
	Moinho de cimento Z5	4 914
	Moinho de cimento Z6	1 236
<b>Total</b>		<b>12 695</b>

**7. Expedição**

a. Fluxos de entrada (cimento I 42,5)

**Tabela 7.47** – Produção de cimento I 42,5 (em ton)

Cimento I 42,5	ton
Moinho de cimento Z4	149 379
Moinho de cimento Z6	171 521
<b>Total</b>	<b>320 900</b>

**Tabela 7.48** – Consumo de materiais de empacotamento (por unidade)

Materiais de empacotamento	Unidade
Sacos (pacotões)	2 010 600
Paletes de madeira	0
<i>Big bags</i>	108 839

**Tabela 7.49** – Consumo de água subterrânea (em m<sup>3</sup>)

Água	m <sup>3</sup>
Água subterrânea	73 156

**Tabela 7.50 – Consumo de energia elétrica na expedição (em m³)**

Energia elétrica	kWh
Expedição + Consumo geral da fábrica (40%)	2 263 111

b. Fluxos de saída (cimento I 42,5)

**Tabela 7.51 – Expedição de cimento I 42,5 (em ton)**

Cimento I 42,5	ton
Cimento expedido	320 900

**Tabela 7.52 – Emissão de partículas (em kg)**

Emissão de partículas	kg
PM <sub>10</sub>	8 702

c. Fluxos de entrada (cimento II 32,5)

**Tabela 7.53 – Produção de cimento II 32,5 (em ton)**

Cimento II 32,5	ton
Moinho de cimento Z4	68 601
Moinho de cimento Z5	155 517
Moinho de cimento Z6	2 591
<b>Total</b>	<b>226 710</b>

**Tabela 7.54 – Consumo de materiais de empacotamento (por unidade)**

Materiais de empacotamento	Unidade
Sacos (pacotões + paletes)	3 470 942
Paletes de madeira	35 434
Big bags	21 799

**Tabela 7.55 – Consumo de água subterrânea (em m³)**

Água	m³
Água subterrânea	73 156

**Tabela 7.56 – Consumo de energia elétrica na expedição (em m³)**

Energia elétrica	kWh
Expedição + Consumo geral da fábrica (40%)	2 263 111

d. Fluxos de saída (cimento II 32,5)

**Tabela 7.57 – Expedição de cimento I 42,5 (em ton)**

<b>Cimento II 32,5</b>	<b>ton</b>
Cimento expedido	226 710

**Tabela 7.58 – Emissão de partículas (em kg)**

<b>Emissão de partículas</b>	<b>kg</b>
PM <sub>10</sub>	8 702

**8. Produção de resíduos**

**Tabela 7.59 – Resíduos industriais banais produzidos (em ton) e respetivo destino final**

<b>RIBs (ton)</b>	<b>Valorização interna</b>	<b>Valorização externa</b>	<b>Eliminação</b>
Crosta e refratários usados	794,0		
Resíduos de betão e de lamas de betão	40,7		
Mistura de resíduos de construção e demolição		22,1	
Restos de granalha usada		306,8	
Cintas transportadoras de borracha		16,3	
Sucata metálica (c/ guia RCD)		192,7	
Cabos não abrangidos 17 04 10		7,1	
Mistura de Metais		255,8	
Mistura de resíduos		153,9	

**Tabela 7.61 – Resíduos industriais perigosos produzidos (em ton) e respetivo destino final**

<b>RIPs (ton)</b>	<b>Valorização interna</b>	<b>Valorização externa</b>	<b>Eliminação</b>
Líquidos de lavagem com hidrocarbonetos			0,1
Outros óleos hidráulicos		3,9	
Água com óleo proveniente dos separadores óleo/água		8,0	
Lamas provenientes dos separadores óleo/água			6,3
Massas lubrificantes			4,7
Resíduos contendo hidrocarbonetos		14,5	
Outros combustíveis incluindo misturas		0,7	
Embalagens metálicas (sprays)		0,4	
Absorventes e materiais filtrantes contaminados		2,6	
Filtros de óleo		0,7	

## Anexo II – Avaliação de impacte da produção dos cimentos I 42,5 e II 32,5 por processo unitário

### 1. Cimento I 42,5

**Tabela 7.62** – Resultados dos indicadores de impacte para a produção de 1 ton de CEM I 42,5, descriminados por processo unitário

Indicadores de impacte	Perfuração e rebentamento	Britagem	Moagem de cru	Moagem de combustíveis	Cozedura do cru	Moagem de cimento	Expedição
<i>PDRA-E</i> (em kg de antimónio eq.)	0	0	0	0	0	0	0
<i>PDRA-F</i> (em MJ)	0	0	0	0	0	0	0
<i>PAG</i> (em kg de CO <sub>2</sub> eq.)	0	0	0	0	729	0	0
<i>PDCO</i> (em kg de CFC-11 eq.)	0	0	0	0	0	0	0
<i>PA</i> (em kg de SO <sub>2</sub> eq.)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,42	0,00	0,00
<i>PE</i> (em kg de NO <sub>x</sub> eq.)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00
<i>POF</i> (em kg de etileno eq.)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
<i>PTH</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	4,2x10 <sup>-3</sup>	4,2x10 <sup>-3</sup>	4,2x10 <sup>-3</sup>	2,0x10 <sup>-4</sup>	181	1,4x10 <sup>-3</sup>	5,5x10 <sup>-3</sup>
<i>PESD</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	0,0	0,0
<i>PESM</i> (em ton de 1,4-DCB eq.)	0,0	0,0	0,0	0,0	16,4	0,0	0,0
<i>PEST</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	0,0	0,0	0,0	0,0	55,6	0,0	0,0

## 2. Cimento II 32,5

**Tabela 7.63** – Resultados dos indicadores de impacto para a produção de 1 ton de *CEM II 32,5*, discriminados por processo unitário

Indicadores de impacto	Perfuração e rebentamento	Britagem	Moagem de cru	Moagem de combustíveis	Cozedura do cru	Moagem de cimento	Expedição
<i>PDRA-E</i> (em kg de antimónio eq.)	0	0	0	0	0	0	0
<i>PDRA-F</i> (em MJ)	0	0	0	0	0	0	0
<i>PAG</i> (em kg de CO <sub>2</sub> eq.)	0	0	0	0	521	0	0
<i>PDCO</i> (em kg de CFC-11 eq.)	0	0	0	0	0	0	0
<i>PA</i> (em kg de SO <sub>2</sub> eq.)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00
<i>PE</i> (em kg de NO <sub>x</sub> eq.)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00
<i>POF</i> (em kg de etileno eq.)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
<i>PTH</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	0,0	0,0
<i>PESD</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	3,0x10 <sup>-3</sup>	3,0x10 <sup>-3</sup>	3,0x10 <sup>-3</sup>	1,4x10 <sup>-4</sup>	146	1,7x10 <sup>-3</sup>	5,5x10 <sup>-3</sup>
<i>PESM</i> (em ton de 1,4-DCB eq.)	0,0	0,0	0,0	0,0	13,3	0,0	0,0
<i>PEST</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	0,0	0,0	0,0	0,0	39,8	0,0	0,0

**Anexo III – Avaliação de impacto dos processos de produção de energia primária e do transporte de materiais para a fábrica do Outão**

**Tabela 7.64 – Resultados dos indicadores de impacto para a produção de energia primária consumida na produção de 1 ton de CEM I 42,5, discriminados por tipo de energia**

Indicadores de impacto	Gasóleo	Fuelóleo	Energia elétrica
<i>PDRA-E</i> (em kg de antimónio eq.)	$4,3 \times 10^{-9}$	$5,9 \times 10^{-8}$	$1,4 \times 10^{-6}$
<i>PDRA-F</i> (em MJ)	1,6	13,6	834,8
<i>PAG</i> (em kg de CO <sub>2</sub> eq.)	$1,1 \times 10^{-2}$	0,1	67,3
<i>PDCO</i> (em kg de CFC-11 eq.)	$4,3 \times 10^{-11}$	$1,8 \times 10^{-9}$	$4,0 \times 10^{-7}$
<i>PA</i> (em kg de SO <sub>2</sub> eq.)	$1,1 \times 10^{-4}$	$7,0 \times 10^{-4}$	0,4
<i>PE</i> (em kg de NO <sub>x</sub> eq.)	$1,3 \times 10^{-5}$	$5,6 \times 10^{-5}$	$2,6 \times 10^{-2}$
<i>POF</i> (em kg de etileno eq.)	$9,2 \times 10^{-6}$	$7,0 \times 10^{-5}$	$2,4 \times 10^{-2}$
<i>PTH</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	$2,2 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-2}$	6,8
<i>PESD</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	$2,4 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-3}$	0,4
<i>PESM</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	1,0	17,3	10 904
<i>PEST</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	$6,9 \times 10^{-4}$	$5,0 \times 10^{-4}$	0,2

**Tabela 7.65 – Resultados dos indicadores de impacto para os processos de transporte envolvidos na produção de 1 ton de CEM I 42,5, discriminados por tipo de transporte**

Indicadores de impacto	Transporte rodoviário	Transporte marítimo
<i>PDRA-E</i> (em kg de antimónio eq.)	$2,4 \times 10^{-6}$	0,0
<i>PDRA-F</i> (em MJ)	561,2	0,0
<i>PAG</i> (em kg de CO <sub>2</sub> eq.)	41,5	$9,1 \times 10^{-2}$
<i>PDCO</i> (em kg de CFC-11 eq.)	$8,1 \times 10^{-8}$	0,0
<i>PA</i> (em kg de SO <sub>2</sub> eq.)	0,2	$3,3 \times 10^{-3}$
<i>PE</i> (em kg de NO <sub>x</sub> eq.)	$4,5 \times 10^{-2}$	$3,1 \times 10^{-4}$

**Tabela 7.65** – Resultados dos indicadores de impacto para os processos de transporte envolvidos na produção de 1 ton de *CEM I* 42,5, discriminados por tipo de transporte (cont.)

Indicadores de impacto	Transporte rodoviário	Transporte marítimo
<i>POF</i> (em kg de etileno eq.)	$1,4 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-4}$
<i>PTH</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	1,4	$3,1 \times 10^{-3}$
<i>PESD</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	$4,5 \times 10^{-2}$	0,0
<i>PESM</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	707,6	0,0
<i>PEST</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	$2,0 \times 10^{-2}$	0,0

**Tabela 7.66** – Resultados dos indicadores de impacto para a produção de energia primária consumida na produção de 1 ton de *CEM II* 32,5, discriminados por tipo de energia

Indicadores de impacto	Gasóleo	Fuelóleo	Energia elétrica
<i>PDRA-E</i> (em kg de antimónio eq.)	$3,1 \times 10^{-9}$	$4,2 \times 10^{-8}$	$9,6 \times 10^{-7}$
<i>PDRA-F</i> (em MJ)	1,2	9,7	570,3
<i>PAG</i> (em kg de CO <sub>2</sub> eq.)	$8,2 \times 10^{-3}$	$7,6 \times 10^{-2}$	46,0
<i>PDCO</i> (em kg de CFC-11 eq.)	$3,1 \times 10^{-11}$	$1,3 \times 10^{-9}$	$2,8 \times 10^{-7}$
<i>PA</i> (em kg de SO <sub>2</sub> eq.)	$8,2 \times 10^{-5}$	$5,0 \times 10^{-4}$	$2,7 \times 10^{-1}$
<i>PE</i> (em kg de NO <sub>x</sub> eq.)	$9,3 \times 10^{-6}$	$4,0 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-2}$
<i>POF</i> (em kg de etileno eq.)	$6,7 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-5}$	$1,7 \times 10^{-2}$
<i>PTH</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	$1,6 \times 10^{-3}$	$7,9 \times 10^{-3}$	4,6
<i>PESD</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	$1,7 \times 10^{-4}$	$8,0 \times 10^{-4}$	$2,4 \times 10^{-1}$
<i>PESM</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	$7,0 \times 10^{-1}$	12,3	7 449
<i>PEST</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	$5,0 \times 10^{-4}$	$3,5 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-1}$

**Tabela 7.67 –** Resultados dos indicadores de impacto para os processos de transporte envolvidos na produção de 1 ton de *CEM II 32,5*, descriminados por tipo de transporte

Indicadores de impacto	Transporte rodoviário	Transporte marítimo
<i>PDRA-E</i> (em kg de antimónio eq.)	$1,7 \times 10^{-6}$	0,0
<i>PDRA-F</i> (em MJ)	400,8	0,0
<i>PAG</i> (em kg de CO <sub>2</sub> eq.)	31,3	$6,5 \times 10^{-2}$
<i>PDCO</i> (em kg de CFC-11 eq.)	$5,8 \times 10^{-8}$	0,0
<i>PA</i> (em kg de SO <sub>2</sub> eq.)	0,1	$2,3 \times 10^{-3}$
<i>PE</i> (em kg de NO <sub>x</sub> eq.)	$3,4 \times 10^{-2}$	$2,2 \times 10^{-4}$
<i>POF</i> (em kg de etileno eq.)	$1,1 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-4}$
<i>PTH</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	1,1	$2,2 \times 10^{-3}$
<i>PESD</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	$3,2 \times 10^{-2}$	0,0
<i>PESM</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	505,4	0,0
<i>PEST</i> (em kg de 1,4-DCB eq.)	$1,4 \times 10^{-2}$	0,0